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

Band: 2 (1936)

Rubrik: Contrôle des soudures

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: 13.12.2025

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

III c

Contrôle des soudures.

Prüfung der Schweißnähte.

Inspection and control of welded joints.

Leere Seite
Blank page
Page vide

IIIc1

Calcul des soudures basé sur la conservation de l'énergie de déformation.

Berechnung der Schweißnähte unter Berücksichtigung konstanter Gestaltsänderungsenergie.

Calculation of Welds under Consideration of Constant Deformation Energie.

Ir. N. C. Kist,
Professor an der Technischen Hochschule, Delft.

Les essais du Professeur *Jensen* ont démontré que la théorie de la conservation de l'énergie de déformation fournit exactement les rapports existant entre les tensions de rupture des soudures d'angle chargées dans différentes directions. La plasticité est appliquée au calcul des assemblages statiquement indéterminés. Se basant sur la théorie et sur les essais, l'auteur tire les conclusions qui sont exposées à la fin de ce rapport.

D'après les normes allemandes (DIN 4100) concernant les constructions métalliques soudées, le «Code for Fusion Welding and Gascutting in Building Construction» américain ainsi que d'après d'autres normes encore, la grandeur des tensions admissibles dans une soudure d'angle est la même pour toutes les directions que peut prendre la charge. La résistance est cependant beaucoup plus grande lorsque la force agit perpendiculairement à la soudure (ligne CD dans la figure 1) que lorsqu'elle agit dans le sens de la soudure elle-même. Le professeur américain *Cyril D. Jensen* a publié dans le «Journal of the American Welding Society» de février 1934 les résultats d'une série d'essais interessants sur la résistance des soudures frontales pour différentes valeurs de l'angle α formé par la direction de la force AB et la ligne de soudure CD (voir la fig. 1). Les tensions de rupture $\sigma_{B\alpha}$ calculées par le professeur *Jensen* sont portées dans la figure 2 de telle sorte que la longueur du vecteur représente la grandeur de la tension de rupture et l'angle de ce vecteur avec l'axe des abcisses, l'angle α. Le professeur *Jensen* n'a pas contrôlé ses résultats avec la théorie de la conservation de l'énergie de déformation. Si l'on fait ce contrôle on constate une concordance parfaite. La ligne pointillée donne le point où devrait se trouver l'extrémité des vecteurs calculés d'après cette théorie.

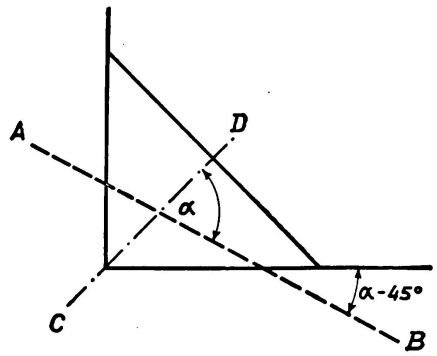


Fig. 1.

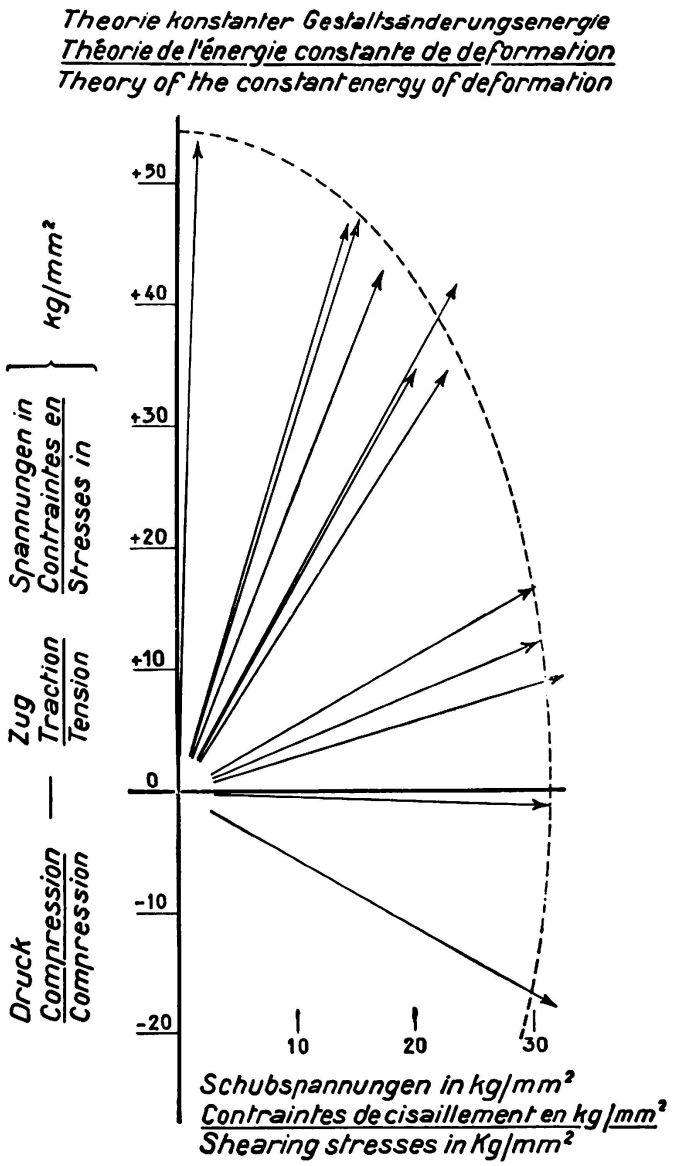


Fig. 2.

Nous adopterons dans notre travail la notation suivante:

$\sigma_{B\alpha}$ représente la tension de rupture lorsque la force fait un angle α avec la soudure.

σ la composante de $\sigma_{B\alpha}$ perpendiculaire au plan de rupture.

τ la composante de $\sigma_{B\alpha}$ située dans la plan de rupture.

$\sigma_{B\,Zug}$ la tension résultant d'une surcharge normale.

D'après la théorie de la conservation de l'énergie de déformation, la rupture se produit lorsque:

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sigma_{B\,Zug}$$

et

$$\sigma_{B\alpha} = \sigma_{B\,Zug} \frac{1}{\sqrt{\sin^2\alpha + 3\cos^2\alpha}}$$

La valeur moyenne de $\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$ est tirée des essais du professeur *Jensen* et de ces moyennes, la valeur de $\sigma_{B\alpha}$ dont l'extrémité est représentée dans la figure 2 par la ligne pointillée.

La concordance des essais du professeur *Jensen* avec la théorie de la conservation de l'energie de déformation est si surprenante que le professeur *Jensen* a pu contrôler *d'autres* théories de rupture au moyen de ses résultats. Il en a tiré la conclusion que ou bien les tensions de rupture $\sigma_{B\alpha}$ ne coïncident pas avec ces théories de rupture en question, ou bien que ses mesures étaient fausses. Nous terminons en disant que les tensions de rupture concordent très bien avec la théorie de la conversation de l'énergie de déformation et que les recherches du professeur *Jensen* sont très exactes.

Ces recherches ne se rapportent qu'aux soudures frontales (ligne CD de la fig. 1) qui sont sollicitées soit à la traction et au cisaillement, soit au cissaillement et à une légère compression. Elles ne concernent pas les soudures sollicitées principalement à la compression. Les éprouvettes étaient construites de telle sorte que l'on pouvait déterminer *avec précision la direction de la force,* ce qui était nécessaire pour la détermination exacte de α. Cependant la direction statique de la force est généralement indéterminée et dans ce cas il est nécessaire pour les calculs de $\sigma_{B\alpha}$ de calculer α.

Nous proposons, *en nous basant sur la théorie de la plasticité, de choisir la direction de la force dans les soudures (c'est-à-dire l'angle α) de telle sorte que dans les calculs, la plus grande force que doit supporter la construction soit encore conciliable avec l'équilibre des forces.*

Nous allons illustrer ceci par un exemple. La figure 3 représente une éprouvette de soudure frontale sollicitée par une force de traction P. Les directions des forces que doivent supporter les soudures peuvent former un angle quelconque avec l'horizontale. Désignons cet angle par $\alpha - 45^0$ (voir la fig. 1). L'angle avec la soudure est donc α. Si l'on désigne par F la surface de contact de deux soudures juxtaposées (ligne CD de la fig. 1), la force oblique qui entraine la rupture est:

$$\frac{1}{2} F \sigma_{B\alpha} = \frac{1}{2} F \frac{\sigma_{B\,Zug}}{\sqrt{\sin^2 \alpha + 3 \cos^2 \alpha}}$$

Par suite de l'obliquité des forces dans la soudure, les pièces latérales sont pressées contre la pièce centrale. La rupture de l'éprouvette ne se produira que lorsque le frottement entre la pièce centrale et les pièces latérales sera vaincu. La

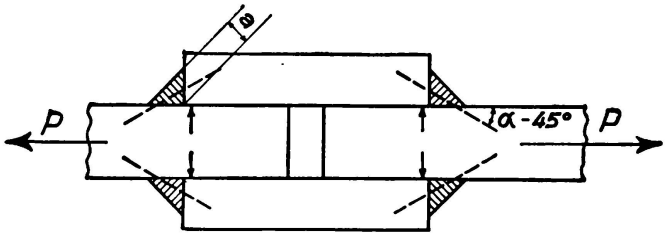


Fig. 3.

force de rupture P est ainsi la somme des composantes horizontales des forces obliques et de la résistance due au frottement. Les composantes horizontales des forces obliques de rupture sont:

$$\frac{1}{2} F \frac{\sigma_{B\,Zug}}{\sqrt{\sin^2 \alpha + 3 \cos^2 \alpha}} \cos (\alpha - 45^0)$$

et les composantes verticales:

$$\frac{1}{2} F \frac{\sigma_{BZug}}{\sqrt{\sin^2 \alpha + 3 \cos^2 \alpha}} \sin (\alpha - 45^0)$$

Si l'on représente par μ le coefficient de frottement, on peut écrire:

$$P = 2 \cdot \frac{1}{2} F \frac{\sigma_{B\,Zug}}{\sqrt{\sin^2 \alpha + 3 \cos^2 \alpha}} \left[\cos (\alpha - 45^0) + \mu \sin (\alpha - 45^0)\right]$$

La pièce centrale est fortement comprimée par les pièces latérales, il en résulte que le coefficient de frottement doit être choisi plus grand que dans les cas de compression modérée. Nous admettons un coefficient aussi grand que pour les assemblages rivés, c'est-à-dire 0,2. Notre formule devient alors:

$$P = F \frac{\sigma_{B\,Zug}}{\sqrt{\sin^2 \alpha + 3 \cos^2 \alpha}} \left[\cos (\alpha - 45^0) + 0{,}2 \sin (\alpha - 45^0)\right]$$

En nous basant sur la loi de la plasticité, la valeur de α doit être telle que P soit maximum

C'est le cas pour $\alpha = 79^0$; notre équation devient alors:

$$P = F \cdot \sigma_{B\,Zug} \cdot 0{,}908$$

(forme de construction de la fig. 3)

L'influence de la force est sensiblement différente dans le cas de la figure 4. La compression entre les pièces n'existe pas dans ce cas et pour que le système soit en équilibre, il faut que les forces agissant dans les soudures supérieures, respectivement dans les soudures inférieures soient directement opposées. Pour des raisons de symétrie, il faut encore que ces forces soient horizontales ainsi que le montre la figure 4.

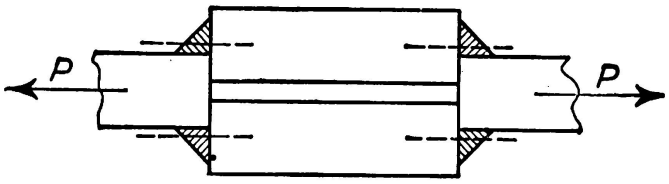


Fig. 4.

L'angle est donc dans ce cas de 45^0 et

$$P = F \frac{\sigma_{B\,Zug}}{\sqrt{\sin^2\alpha + 3\cos^2\alpha}} = 0{,}71\, F\, \sigma_{B\,Zug}$$

(méthode de construction de la figure 4). Si dans l'éprouvette de la figure 3 on remplace la traction par de la compression, la pression entre les pièces latérales et la pièce centrale n'existe plus. Dans ce cas nous avons aussi $\alpha = 45^0$ et

$$P = 0{,}71\, F\, \sigma_{B\,Zug}$$

Nous allons maintenant essayer une méthode de calcul basée sur les hypothèses suivantes:

1° La rupture se produit là où le profil de la soudure est le plus faible; du moins exécuterons-nous nos calculs comme si tel était le cas.

2° D'après la théorie de la conservation de l'énergie de déformation, la tension de rupture $\sigma_{B\alpha}$ engendrée par une force agissant sous un angle α est égale à la tension de traction normale qui entraine la rupture multipliée par

$$\frac{1}{\sqrt{\sin^2\alpha + 3\cos^2\alpha}}$$

3° D'après la théorie de la plasticité on choisira les grandeurs hyperstatiques de telle sorte que les calculs tiennent compte de la plus grande surcharge qui peut entrainer la rupture de la construction. Ceci concerne tout autant l'angle sous lequel doit agir la force dans une soudure que la répartition des forces sur plusieurs soudures.

Si le calcul d'après la troisième hypothèse est trop compliqué, il faudra faire une supposition pratique concernant les grandeurs hyperstatiques. Cette supposition nous conduit à calculer un état de charge qui est plus petit que la

véritable surcharge de rupture. Il faut encore faire remarquer que l'hypothèse 3° n'est pas valable pour des surcharges répétées alternées (se répétant par exemple un million de fois) car le matériau n'est plus plastique dans ce cas. Ce procédé de calcul ne peut être employé que pour des constructions dont les surcharges ne varient que peu ou pas souvent, par ex. pour les charpentes. De toute façon elle doit encore être vérifiée par des essais.

D'entente avec la Commission hollandaise de standardisation pour les constructions métalliques soudées (36 C) et avec la gracieuse collaboration des maison «Willem Smit en Co's Transformatorenfabriek» à Nimègue, «Arcos-electrolasch» à Amsterdam et «Nederlandsche Kjellberg Electrodenfabriek» à Amsterdam, l'Ecole Polytechnique de Delft (Hollande) a entrepris une série d'essais sur des éprouvettes soudées électriquement afin de contrôler les hypothèses que nous avons indiquées ci-dessus. Dans la tabelle, une colonne donne

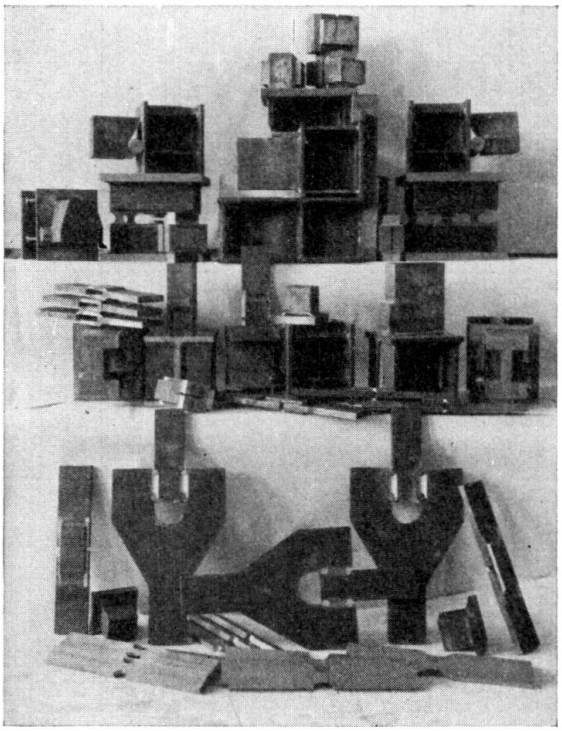
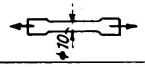
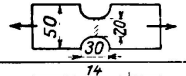
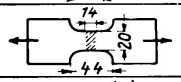
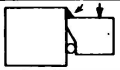
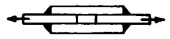
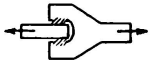
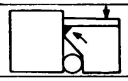
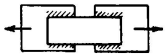
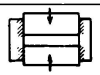
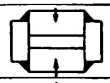


Fig. 5.

les esquisses des éprouvettes, une autre indique le type de soudure et la suivante l'angle formé par la direction de la force d'une part et par le plus petit profil en travers de la soudure d'autre part.

Nous avons construit trois éprouvettes de chaque type; une éprouvette fut soudée avec les baguettes à résistance de Smit, une autre avec les baguettes Stabilend de la Maison Arcos et la troisième au moyen des baguettes O — K de Kjellberg. Les tensions de rupture inscrites sont les moyennes des quotients de la plus grande force supportée par la soudure et du plus petit profil en travers de cette même soudure. Les tensions de rupture sont comparées avec les tensions moyennes de rupture d'une barre normale (10 mm, mesurée sur 50 mm) constituée uniquement de métal d'apport. Les tensions moyennes de 9 de ces barres (fabriquées avec les baguettes de chaque marque) furent mesurées et sont portées sous XVI dans le tableau. Elles sont égales à 48,3 kg/mm².

Nº	Eprouvette	Type de soudure	Genre de sollicitation	Contrainte de rupture en kg/mm²	Rapport à XVI observé	Rapport à XVI calculé	Contrainte pour une pénétration de 0,2 mm/m kg/mm²	Rapport à XVI	Contrainte pour une pénétration de 1,0 mm/m kg/mm²	Rapport à XVI	Bessel kg/mm²	Vogel kg/mm²	Essais de Dresde kg/mm²	Boston kg/mm²	Hohn kg/mm²	Mac Gibbon kg/mm²	E.T.H. Zürich kg/mm²	R.S.W. kg/mm²	
XVI		Tout en métal d'apport	Traction normale	48,3															
I		Soudure bout à bout	Traction normale	49,3	1,02	1,00					38,0 [1]							34,0 [1]	non usiné
II		Soudure bout à bout	Traction normale	50,1	1,04	1,00											40,0		
VII		Soudure frontale	Traction normale	57,3	1,19	1,00													
VIII		Soudures frontales	Traction à 79° et frottement	51,9	1,07	0,91						46,5		45,0	41,0		49,5	35,0	
IX		Soudures frontales	Traction à 45°	33,4	0,69	0,71													
VI		Soudures bout à bout	Cisaillement	31,1	0,64	0,58													
X		Soudure frontale	Cisaillement	29,9	0,62	0,58													
XIV		Soudures latérales	Cisaillement et traction secondaire	30,9	0,64	0,58					32,0	40,0		34,0	28,0	39,0	35,4	29,0	
XV		Soudures latérales	Cisaillement et compression secondaire	35,6	0,74	0,58						50,0				48,0			
XI		Soudures frontales	Compression à 45°	40,6	0,84	0,71						42,5							
XII		Soudures frontales	Compression à 72°	> 64,1	> 1,33	0,82	37,8	0,78	55,0	1,14			> 53,0						
V		Soudures bout à bout	Compression	> 78,8	> 1,63	1,00	37,8	0,78	48,1	1,00			> 46,0						
XIII		Soudure frontale	Compression	> 70,7	> 1,46	1,00	61,6	1,27											

Nous avons employé l'acier 37 pour la confection des éprouvettes. Les rapports entre les tensions moyennes de rupture des éprouvettes soudées et les tensions moyennes de rupture des barres en métal d'apport sont portés dans la 6ème colonne du tableau. Ensuite vient dans la 7ème colonne le résultat que l'on obtiendrait si les hypothèses à vérifier étaient exactes. La comparaison des chiffres des colonnes 6 et 7 donne le contrôle de l'exactitude des hypothèses. La photographie représente les différentes éprouvettes avant les essais. Les éprouvettes I, II, V et VI sont soudées bout-à-bout et sont usinées exactement (épaisseur de 10 à 14 mm). Les autres éprouvettes sont soudées à angle et furent contrôlées avec l'appareil du Dr. ing. *H. Schmuckler* (appareil qui s'est révélé très utile pour ces mesures). Les tensions de rupture sont rapportées au profil mesuré (épaisseur mesurée «a» multipliée par la longueur mesurée de la soudure). En général l'épaisseur de la soudure était de 4 mm, mais les mesures ont montré que cette épaisseur était dépassée.

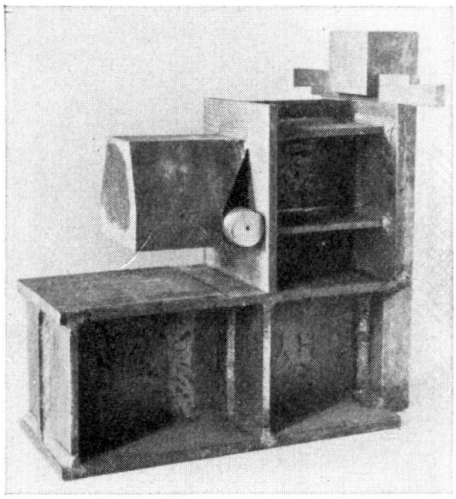


Fig. 6.

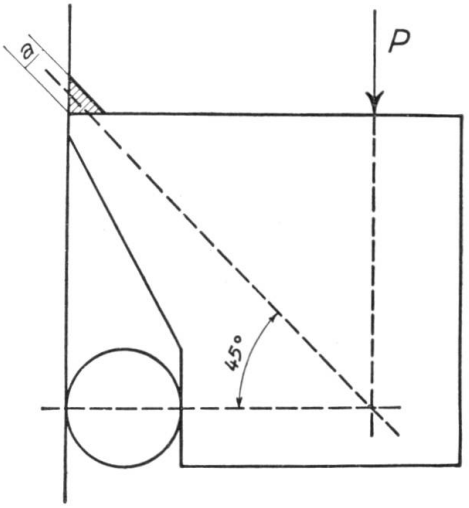


Fig. 7.

La figure 6 représente une éprouvette du type VII renforcée par un étrier, ceci afin de permettre la mise en place sur la presse. La figure 7 montre par quel procédé la soudure fut soumise à la traction. Si P est la force de rupture, «b» la largeur de la soudure et «a» son épaisseur, la tension de rupture est égale à $P \frac{2}{a \cdot b}$. La forme de cette éprouvette ainsi que celle de l'éprouvette X est conforme aux essais de *Jensen*. Le jeu des forces dans les éprouvettes des types VIII et IX à déjà été expliqué plus haut. La photographie de la figure 8 représente une éprouvette du type VI après les essais. Les éprouvettes X sont identiques aux éprouvettes du type VII à la seule différence que le cordon de soudure se trouve au dessous de l'aile supérieure de la poutre en T; il en résulte que la soudure sera sollicitée au cisaillement.

Dans le cas des éprouvettes XII, V et XIII, les soudures étaient sollicitées à la compression sous un angle de 72°, respectivement à la compression normale. Dans ce cas il n'y eut pas de rupture car la soudure s'est étirée sans se rompre. Les écrasements des soudures ouvertes furent mesurés et les tensions pour des

écrasements de 0,2 et de 1,0 mm sont reportés dans le tableau. Dans la colonne «Tensions de rupture» sont portées les tensions mesurées au moment où les essais ne pouvaient être poussés plus loin. Durant le soudage des éprouvettes XII et XIII, on introduisit des plaques de cuivre dans les intervalles laissés libres, afin d'empêcher à la soudure d'y couler. Dans les calculs nous avons introduit l'épaisseur «a» (voir les fig. 9 et 11). Dans le cas de l'éprouvette XII, l'angle α compris entre la direction de la force à supporter par la soudure (ligne AB de la fig. 9) et le plus petit profil de la soudure n'est pas statiquement déterminé. Si l'on désigne par F la somme des plus petits profils (CD) des deux soudures, la force oblique de rupture pour une soudure est;

$$\frac{1}{2} F \sigma_{B\alpha} = \frac{\sigma_{B\,Zug}}{\sqrt{\sin^2 \alpha + 3 \cos^2 \alpha}}$$

La direction de cette force fait un angle de $\alpha - 45^0$ avec la verticale. Du fait que les composantes horizontales s'équilibrent dans la soudure, la force P supportée par l'éprouvette est égale à la somme des composantes verticales.

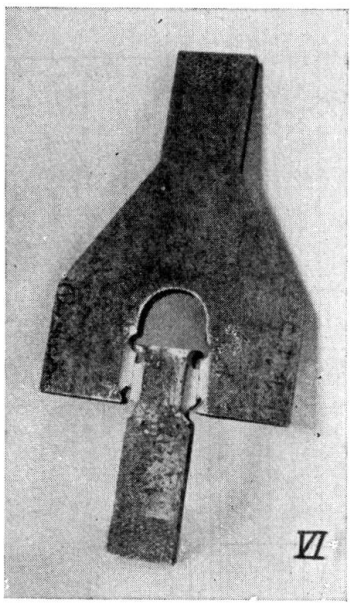


Fig. 8.

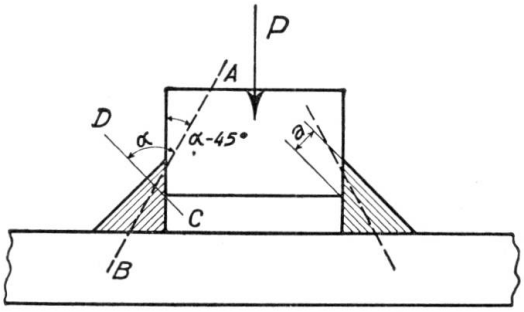


Fig. 9.

Donc

$$P = 2 \frac{1}{2} F \frac{\sigma_{B\,Zug}}{\sqrt{\sin^2 \alpha + 3 \cos^2 \alpha}} \cos (\alpha - 45^0)$$

Cette force est maximale pour $\alpha = 72^0$ et est égale à

$$P = 0{,}82\, F \sigma_{B\,Zug}$$

La photographie 10 représente une éprouvette du type V après les essais. Les soudures se trouvent dans les coins les plus faibles. Les âmes de la poutrelle qui étaient distantes de 9 mm avant les essais se touchent. Le jeu des forces dans le cas de l'éprouvette XIII est expliqué par la figure 11. La soudure inférieure est chargée suivant la direction BA, c'est-à-dire à la compression normale. La force est égale à

$$P\frac{AB}{AC} \text{ et la tension à } P\frac{AB}{AC} : ab$$

où «b» représente la longueur de la soudure. Malgré les épaisseurs de 8 mm pour les soudures supérieures et de 3 mm pour les inférieures, se furent les supérieures qui se rompirent en premier lieu. Les essais qui étaient faits pour la soudure inférieure, ne purent ainsi être poussés jusqu'au point où les deux parties devaient se rencontrer ou bien encore jusqu'à une pénétration de 1 mm. Pour un raccourcissement de la fente de 0,2 mm on mesura cependant les tensions qui sont portées dans le tableau. Nous avons aussi examiné si les mesures faites par d'autres observateurs concordaient avec la théorie exposée ci-dessus. Ces essais ne s'écartent que peu sur toute la série des cas de charge.

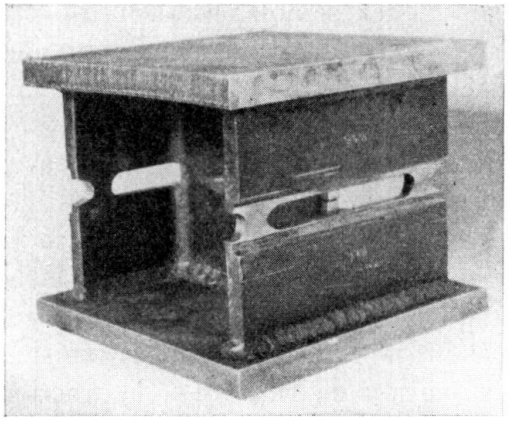


Fig. 10.

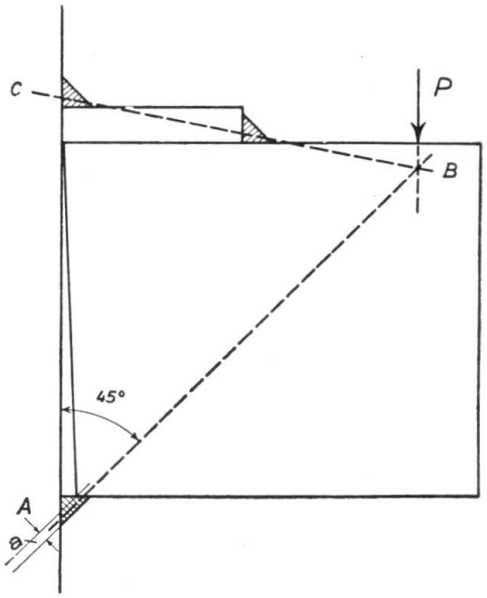


Fig. 11.

Il est par conséquent difficile de contrôler la théorie par ces observations; on ne peut pas comparer entre eux les essais de différents observateurs. Nous n'avons pris en considération que les essais qui s'étendent à plusieurs cas de surcharge. Ce sont les essais suivants:

C. Bessel, essais publiés dans le «Stahlbau» 1931, N° 23. Les résultats sont portés dans le tableau sous «Bessel».

Andrew Vogel, «Journal of the American Welding Society» avril 1929. Dans le tableau sous «Vogel».

Les essais de soudures de Dresde, «Der Stahlbau» 1931, N° 12.

Report of tests, «Boston Section-Journal of the American Welding Society». Dans le tableau sous «Boston».

E. Hohn, Congrès int. de la construction métallique à Liége, sept. 1930. Dans le tableau sous «Hohn».

P. P. Mac Gibbon, «First Communications of the New International Association for Testing Materials», page 155. Dans le tableau sous «Mc. Gibbon».

Laboratoire fédéral d'essais des matériaux annexé à l'E. P. F. Zurich, rapport N° 86, page 5. Dans le tableau sous «E. T. H. Zurich».

«Report of Structural Steel Welding Committe of the American Bureau of Welding.» Dans le tableau sous «R. S. W.»

Les valeurs données dans le tableau sous les désignations «*Bessel*», «*Vogel*» etc. sont la moyenne des valeurs extrêmes de la série.

Comparons maintenant la théorie ci-dessus avec les valeurs données dans le tableau. Nous remarquons tout d'abord que dans la série des essais, nous avons porté en premier lieu les éprouvettes dont les soudures sont sollicitées à une traction normale à leur plus petit profil (I, II et VII). Viennent ensuite les éprouvettes dont les soudures sont sollicitées à une traction oblique mais agissant sous un angle diminuant graduellement (VIII et IX). Nous avons porté ensuite les éprouvettes servant aux mesures de résistance au cisaillement et enfin les éprouvettes sollicitées à une compression normale.

Si l'on compare les rapports mesurés et calculés entre les tensions de rupture dans les soudures et les tensions de rupture dans les barres normales de métal d'apport, on constatera que les premiers sont un peu plus grands que les derniers. Jusqu'à l'éprouvette XII ces rapports sont assez semblables. Dans le cas des soudures comprimées sous un angle de 72° (XII) ainsi que dans celui des soudures comprimées normalement (V et XIII), ce rapport est sensiblement plus grand que celui qui a été calculé. La théorie n'est pas valable pour une compression se faisant sous un angle plus grand que 45°. Ceci concorde avec l'emploi fait dans la pratique de tensions admissibles plus grandes pour la compression que pour la traction, puisque la resistance des soudures à la compression est supérieure, ce qui est valable non seulement pour les soudures bout à bout mais aussi pour les soudures d'angle. Les soudures comprimées XIII sont très fortes; en effet, pour une pénétration de 0,2 mm, la tension mesurée est déjà 1,27 fois plus grande que la tension de rupture à la traction du métal d'apport. Dans la pratique, la résistance d'un assemblage tel que celui des éprouvettes XII et XIII sera beaucoup plus grande car la pénétration du métal d'apport dans la fente ne sera pas entravée par l'introduction de plaques de cuivre comme c'était le cas pour les éprouvettes. Il serait important de faire des essais avec des éprouvettes soudées sans empêcher la pénétration du métal d'apport dans la fente; ce qui se produit dans la pratique pour des assemblages de colonnes dont la partie inférieure n'a pas été bien travaillée ou pour des attaches de poutres à des colonnes. (A Dresde on fit des essais de ce genre avec une éprouvette du type XII mais nous savons seulement que la tension de rupture[1] était supérieure à 52,5 kg/mm².

Les éprouvettes XI présentent le plus grand écart avec la théorie si on les compare aux éprouvettes XII, V et XIII dont les soudures sont soumises à une compression sous un angle de 72° ou normalement. Le rapport entre la tension de rupture mesurée et la tension de rupture du métal d'apport est égal à 0,74 alors qu'il devrait être égal à 0,58 d'après la théorie. Les éprouvettes sont donc $\frac{0,74}{0,58} = 1,24$ fois plus solides. Elles ont des soudures latérales sollicitées au cisaillement et elles se diffèrent des éprouvettes XIV en ce que les parties soudées sont soumises à la compression et non à la traction. Par conséquent les soudures s'allongent au lieu de se raccourcir. Les essais de *Vogel* et de

[1] Par tension de rupture on entend le quotient de la force agissant sur l'assemblage par la somme des plus petits profils de la soudure.

Mac Gibbon démontrent que les soudures latérales entre les pièces comprimées résisteront mieux à la compression qu'à la traction. Ceci s'explique par le fait que les soudures se raccourciraient durant le refroidissement si elles n'en étaient empêchées par les pièces à assembler. La soudure est ainsi sollicitée avant les essais par une tension de traction qui diminue lorsque l'éprouvette est soumise à des essais de compression. D'après la théorie de la plasticité, ce fait ne devrait avoir aucune influence sur la résistance à la rupture.

Il en résulte que ce sont les éprouvettes VIII et VII qui s'écartent le plus de la théorie. La résistance est dans ces cas $\frac{1,07}{0,91} = 1,19$, respectivement $\frac{1,19}{1,00} = 1,19$ plus grande que d'après les calculs. D'une manière générale, les résultats obtenus avec les autres éprouvettes I, II, IX, X et XIV ne s'écartent qu'au maximum de 10 % des valeurs tirées de la résistance à la traction du métal d'apport et ceci dans le même sens que les premières, à une exception près (IX).

D'une manière générale on peut dire que les tensions de rupture tirées des essais sont plus grandes que celles calculées pour une barre normale de métal d'apport. Ceci est autant valable pour les soudures d'angle que pour les soudures bout à bout. Les tensions de rupture varient avec l'angle sous lequel agit la force sur le plus petit profil; cette variation est semblable à celle de l'angle. Une soudure d'angle du type VII peut être considérée comme très résistance.

Conclusions

De ce qui précède nous pouvons tirer les conclusions suivantes concernant le calcul des assemblages soudés des charpentes soumises à une surcharge statique:

1° Ce n'est pas exact de calculer toutes les soudures d'angle avec la même tension admissible réduite ainsi que le prescrivent les normes allemandes «DIN 4100» et le «Code for Fusion Welding and Gascutting in Building Constructions».

2° Les normes doivent prescrire les mêmes tensions admissibles pour les soudures d'angle et pour les soudures bout à bout et la grandeur de ces tensions admissibles doit dépendre de l'angle formé par la direction de la force d'une part et par le plus petit profil de la soudure d'autre part.

3° La théorie de la conservation de l'énergie de déformation donne d'une façon exacte le rapport existant entre la traction de rupture normale et une tension de rupture oblique. Des soudures soumises à une compression normale ou oblique sous un angle plus grand que 45° sont beaucoup plus résistantes que le montrent les calculs de la traction de rupture.

4° Nous avons fait les deux hypothèses suivantes:

la rupture d'une soudure d'angle se produit toujours dans le plus petit profil;

dans les constructions hyperstatiques, la direction de la force est, d'après la théorie de la plasticité, toujours telle qu'elle s'accorde le mieux possible avec l'équilibre du système.

Ces deux hypothèses fournissent pour la pratique d'excellents résultats.

Résumé.

L'auteur s'occupe, au début de son mémoire, de l'application de la théorie aux assemblages soudés. Il décrit ensuite ses propres essais et les compare aux essais déjà publiés. Ces essais confirment, dans ce domaine, la justesse de la théorie de la constance de l'énergie de déformation.

IIIc 2

Méthodes d'essai à l'atelier et sur le chantier.

Prüfungsmethoden im Werk und auf der Baustelle.

Testing Methods in Workshop and ad Site.

M. Pinczon,
Ingénieur en Chef Conseil, des Chantiers et Ateliers de Saint Nazaire.

Le Laboratoire d'essais mécaniques adjoint à l'atelier de soudure du *Chantier de Penhoët* n'a pas été créé dans le but de faire des recherches théoriques sur la soudure par fusion. Son rôle est d'assurer un contrôle scientifique, aussi méthodique et aussi constant que possible, des travaux de toute nature exécutés dans cet atelier.

Ces travaux sont d'ailleurs, pour la très grande majorité, des travaux de soudure à l'arc et c'est de cette catégorie particulière de la soudure par fusion qu'il sera exclusivement question dans ce rapport. Nous ne parlerons donc ni de la soudure par résistance, ni de la soudure par points, qui ont cependant quelque intérêt pour la construction métallique; nous laisserons également de côté la soudure par fusion au chalumeau dont les applications sont encore limitées dans notre Chantier.

Celui-ci est, pensons nous, suffisamment connu, puisque c'est de lui, en particulier, qu'est sorti le paquebot «*Normandie*». Nous nous bornerons donc à rappeler qu'on y construit à la fois des coques de navires, des machines à vapeur ou à combustion interne, des chaudières marines ou terrestres; on peut ainsi se rendre compte des applications nombreuses et variées qui s'y présentent pour la soudure à l'arc; celle-ci tend à remplacer de plus en plus le rivetage pour l'assemblage des tôles et des profilés et la fonderie pour certaines pièces mécaniques.

Laissons de côté ce dernier mode d'emploi et bornons-nous aux joints soudés dans les constructions métalliques.

L'utilisation de la soudure à l'arc, au lieu du rivetage, n'a pas changé la nature des conditions que doit réaliser un assemblage, dans une construction métallique, pour en assurer la stabilité sous charge; il faut toujours la réunion d'un tracé judicieux des pièces et de leurs assemblages, d'un choix convenable des matériaux et d'une mise en oeuvre adéquate.

Le tracé relève surtout de la technique pure. Nous retiendrons seulement ce qui concerne le choix des matériaux et la mise en oeuvre.

C'est pour l'étude de ces deux questions qu'il a été jugé utile d'installer un

laboratoire d'essais mécaniques et nous nous proposons d'exposer la méthode de contrôle employée par nous et les résultats d'expérience que nous en avons tirés.

1º — *Le métal de base*

Dans un assemblage soudé, on distingue le métal de base et le métal d'apport. Nous parlerons d'abord du premier. Le choix des qualités mécaniques qu'il doit posséder n'est pas déterminé par des considérations relatives à la soudure; mais il n'en est pas de même de sa composition chimique; l'influence de celle-ci sur les qualités de la soudure et même sur la possibilité de son exécution n'est pas contestable.

Il y a, en effet, des aciers soudables et des aciers non soudables. Il ne suffit d'ailleurs pas de poser les termes de cette classification; on doit en définir le sens; il faut, en outre, instituer une méthode d'essai qui permette de classer un acier donné dans l'une ou l'autre des catégories.

Qu'est-ce donc qu'un acier soudable? Avant de donner la réponse à cette question, rappelons que, dans toute soudure, on distingue trois zônes différentes: au centre, le métal d'apport; aux bords, le métal de base, et, entre les deux, une zône de faible étendue, qu'on appelle la zône intermédiaire.

Ces trois zônes diffèrent par leur origine et par leur traitement thermique. Le métal d'apport provient de l'électrode et, dans une certaine mesure, de son enrobage; il a été obtenu par fusion complète à une température plus ou moins élevée puis refroidi rapidement.

La zône intermédiaire est formée par le mélange plus ou moins intime du métal de l'électrode et du métal de base. La température, au cours de l'opération de soudure a été intermédiaire entre celle de la zône centrale et celle de la fusion commençante.

Enfin, au voisinage de la zône intermédiaire, le métal de base a été, au moment de la soudure, porté à une température élevée, bien qu'inférieure à la température de fusion, puis refroidi à l'air plus ou moins rapidement. Ce traitement thermique a modifié dans une certaine mesure ses qualités mécaniques.

Ce sont là des faits bien connus dans le détail desquels il n'est pas utile d'entrer ici. Ils ont fait l'objet d'une conférence très étudiée de *M. Portevin* à la Faculté de *Lille,* le 23 Février 1933. L'auteur de cette conférence la termine en proposant de définir la soudabilité comme «l'aptitude des métaux à fournir, en opérant d'après les règles établies de la technique de la soudure, un ensemble compact et continu c'est-à-dire exempt de défauts physiques et aussi homogène que possible, c'est-à-dire réalisant au mieux l'uniformité des propriétés demandées par l'usage auquel est destinée la pièce soudée».

Cette définition peut être acceptée dans son ensemble, bien qu'elle donne lieu à quelques réserves de détail sur lesquelles il n'y a pas lieu d'insister.

A quelle méthode doit-on recourir pour l'appliquer à l'étude de la soudabilité d'un acier? Théoriquement, il faudrait isoler chacune des trois parties de la soudure: métal d'apport, métal de base dans la région chauffée et zône intermédiaire, et en déterminer les propriétés physiques et mécaniques pour les comparer à celles

du métal de base dans son état primitif. Il n'y a à cela aucune difficulté pour le métal d'apport: on sait en tirer des éprouvettes de dimensions normales, qu'on peut essayer par les méthodes courantes et sur les machines usuelles.

Il en est autrement pour la zône de chauffage et pour la zône intermédiaire. Ces deux zônes et, en particulier la zône intermédiaire, ont une très faible étendue dans le sens transversal du cordon de soudure et ne se prêtent pas à la prise d'éprouvettes normales si ce n'est l'éprouvette pour essai de résilience. C'est ce que fait remarquer *M. Portevin* dans la conférence déjà citée: «les modes d'essai adoptés, dit-il, devront être obligatoirement des modes d'essai aussi localisés que possible . . . ., ils seront utilement effectués sur très petites éprouvettes avec des machines spécialement conçues à cet effet.»

Des machines répondant à ce programme ont fait l'objet d'une communication de *M. Pierre Chenevard* à l'Académie des Sciences le 30 Janvier 1935 (Technique Moderne du 1/er Mai et du 1/er Juin 1935); mais, si des recherches de cette nature peuvent trouver place au laboratoire d'une usine métallurgique, lorsqu'il s'agit de mettre au point la formule et le mode de préparation d'un nouvel acier, elles sont inapplicables à l'industriel qui ne dispose ni du temps, ni de l'outillage nécessaire, et qui a seulement besoin de savoir rapidement, et à peu de frais, si un acier dont il envisage l'emploi est pratiquement soudable, c'est-à-dire s'il existe sur le marché des électrodes avec lesquelles cet acier, pris comme métal de base, peut fournir des assemblages pratiquement homogènes.

Ainsi posé, le problème paraît susceptible de recevoir une solution simple, que nous avons eu l'occasion d'appliquer il y a déjà plusieurs années, pour des travaux par voie de soudure à effectuer sur le paquebot «*Paris*».

Elle consiste à étudier la zône de chauffage et la zône intermédiaire simultanément sur une éprouvette préparée de la manière suivante. On découpe dans le métal de base primitif une éprouvette de traction ordinaire à section rectangulaire (fig. 1). Sur cette éprouvette, on dispose avec l'électrode dont l'emploi est envisagé, un cordon de soudure longitudinal, disposé symétriquement par rapport à l'axe de l'éprouvette et la recouvrant entièrement. On enlève à la meule le métal déposé et il reste une éprouvette dont l'état moléculaire reproduit avec une fidélité pratiquement suffisante celui des deux zônes à étudier.

Pour qu'il en soit ainsi, il faut que l'épaisseur de l'éprouvette soit faible. Elle dépend du diamètre de l'électrode qu'on compte employer dans le travail de soudure. Pour une électrode de 3,8 mm, l'éprouvette a une épaisseur de 10 mm.

On essaie cette éprouvette sur une machine courante (dans notre laboratoire, c'est une machine Amsler de 50 T.) et on relève la limite d'élasticité, la charge de rupture, l'allongement et la striction.

On a fait, au préalable, les mêmes mesures sur une éprouvette identique du métal de base, sans dépôt préalable de cordon.

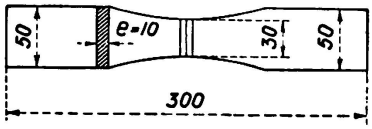
La comparaison des deux séries de résultats permet déjà de se faire une opinion sur l'homogénéité de l'assemblage; on les complète cependant par un autre essai qui met en évidence l'allongement du métal dans la zône intermédiaire. Pour cela, on prépare une éprouvette de pliage (fig. 2) sur une des faces de laquelle on dépose encore un cordon de soudure et, après enlèvement

de celui-ci à la meule, on fait l'essai en plaçant la face qui a reçu le cordon du côté tendu. La comparaison de l'angle de pliage réalisé avant criqûre avec celui que donne le métal primitif donne une base pour la comparaison des allongements.

Enfin un troisième essai est l'essai de résilience. Nous utilisons en général l'éprouvette Mesnager et nous plaçons le cordon de soudure (fig. 3) sur une des faces longitudinales perpendiculaires à l'entaille. Comme pour les essais précédents le cordon est enlevé par meulage et une éprouvette est prise pour référence, dans le métal primitif.

Sans doute, ce procédé fournit un moindre nombre de renseignements que la série d'essais envisagés par *M. Portevin* et on peut lui reprocher de ne pas distinguer pour l'essai de traction entre les deux zônes. Mais il pernet d'obtenir

Fig. 1.



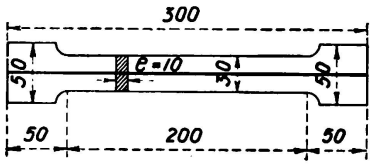
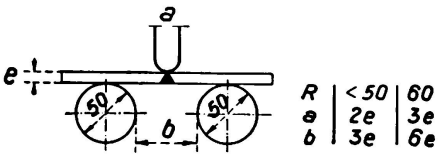


Fig. 4.

Fig. 2.



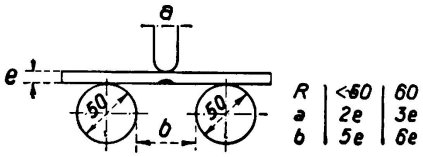
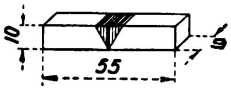


Fig. 5.

Fig. 3.



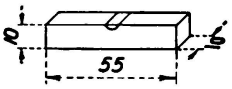


Fig. 6.

à peu de frais et rapidement une discrimination suffisante entre les aciers soudables ou non soudables et jusqu'ici nous n'avons pas eu de difficultés provenant de son emploi.

Voici quelques spécimens de résultats.

Tous les essais que nous allons citer ont été faits en employant un même type d'électrode que nous désignerons par le repère E_1 et qui nous avait, antérieurement, donné des résultats satisfaisants.

Le métal d'apport de cette électrode avait les qualités mécaniques suivantes.

$$E = 47{,}3 \qquad R = 59 \qquad A = 20$$
$$\rho \text{ (Mesnager)} = 6{,}42 \qquad \alpha = 135^{\circ}.$$

Les éprouvettes N° 1 sont celles des figures 1 à 3; les éprouvettes N° 2 sont représentées par les Fig. 4 à 6 et sont soudées bord à bord.

Nous donnerons aux diverses nuances d'aciers essayés les repères A B C etc.

Caractéristiques		Métal de Base	Eprouvettes No. 1	Rapports $\frac{3}{2}$	Eprouvettes No. 2
1		2	3	4	5
		ACIER A			
Traction	E	35,9	46,2	1,29	
	R	62,4	64,6	1,04	55,3
	A	24 %	7 %	*0,29*	
	R + 2A	110	79	0,72	
	Striction	64 %	32 %	0,50	
Pliage	1ère criqûre	180°	62°	*0,35*	
	cassure	—	69°	—	
Résilience (Mesnager)		7,4	3,1	0,42	6,6
		ACIER B			
Traction	E	36,9	—	—	
	R	54,7	57	1,04	52,7
	A	25 %	16,4 %	0,64	
	R + 2A	105	90	0,86	
	Striction	56 %	31 %	0,55	
Pliage	1ère criqûre	—	—	—	
	Rupture	180°	147,0	0,82	
Résilience	(Mesnager)	21,6	9,1	*0,42*	
	UF	10,9	7,9		5,5
		ACIER C			
Traction	E	42,1	48,6	1,16	37,9
	R	68,2	56,8	*0,83*	50,7
	A	25 %	3 %	*0,12*	
	R + 2A	118	63	0,53	
	Striction	54	8 %	0,15	
Pliage		180°	39°	*0,22*	
Résilience		6,8	0,9	0,13	6,9
		ACIER D			
Traction	E	34,6	33	0,96	Pas de relevés
	R	54,5	59,5	1,09	
	A	23 %	17 %	0,74	
	R + 2A	100	94	0,94	
	Striction	52	33	0,64	
Pliage		180°	107°	0,60	
Résilience		7,8	7,5	0,97	

Repères et indications		Electrodes			Courant		Perte de poids par kg de métal déposé		Temps passé par kg de métal déposé		Limite d'élasticité	Charge de rupture	Allongement sur 50 mm	Angle de 1ère criqure	Angle de pliage sans criqure	Résilience		Nombre de Brinell	Résistance à la rupture du métal de base
		Diamètre	Poids	Longueur	I	V	volatilisation	totale	fusion	totale						Mesnager	UF		
		mm	gr	cm			gr	gr			kg	kg	%						kg
E_1	métal déposé	4	44	45	160	22	137	261			44,2	55,2	16,5	125°			7,2	142	
	Bord à Bord P	4	44	45	155	22	180	270	46 m 30s	1h 1 m		55,9		146°			6,6	142	55
E_2	métal déposé	4	44	45	160	26	59	179			47,3	59	20				8,2	155	
	Bord à Bord P.	4	44	45	150	26	109	227	44 m 60s	1h 37 m		59,7		120°			7,03		60
E_5	métal déposé	4	39	40	147	19	185	330	1h 17 m	2h 30 m	32	40	15,6	16°		4		113	
	Bord à Bord P	4	39	40	130	22	93	222	1h 8 m	2h 46 m		42		88°					40
	Bord à Bord V	4	39	40	145	21	103	233	1h 8 m	2h 17 m		40							
	Bord à Bord T	4	39	40	140	20	157	310	1h 17 m	2h 42 m		44							
E^9	métal déposé	4	44	45	170	22	75	222			48,7	57,8	27			21,6	13,7	155	
	Bord à Bord P	4	44	45	170	22			48 m 30s	1h 27 m		61,6			180				60
	Bord à Bord V	4	44	45	170	22						62,6							
	Bord à Bord T	4	44	45	170	22						64,6							

Ce dernier acier est le meilleur des quatre essayés il donne un assemblage pratiquement homogène avec le métal déposé. Il n'en est pas de même des aciers A et C. Pour celui-ci on remarquera que c'est le seul qui donne une valeur de R plus faible dans la zône de chauffage que dans le métal primitif. Cela tient à ce que la résistance élevée du métal primitif avait été obtenue par écrouissage au laminage; l'effet de cet écrouissage a disparu par le chauffage et la résistance a diminué.

Nous n'insistons pas davantage sur ce point, les essais dont nous venons de citer quelques résultats nous ont permis de faire un choix parmi les diverses compositions d'acier qui nous étaient offertes pour une application toute spéciale: acier semi-inoxydable à résistance élevée pour la carène d'un paquebot.

2º) — *Le métal d'apport*

L'étude du métal d'apport n'est autre que celle des diverses qualités d'électrodes. Il en existe un nombre de plus en plus grand sur le marché; leurs fabricants, en les proposant aux industriels, mettent en avant les qualités qu'ils revendiquent pour leurs produits; il est bon de vérifier ces affirmations par des essais personnels et c'est ce que nous faisons couramment.

Nos essais ne comprennent pas seulement la recherche des propriétés mécaniques; nous y ajoutons d'autres données, peut-être moins scientifiques, mais intéressantes au point de vue économique.

Ils comprennent, en général:

1º) — *pour le métal déposé*

a) un essai de traction sur éprouvette cylindrique,
b) un essai de résilience sur éprouvette UF ou Mesnager, suivant le client auquel est destiné l'ouvrage soudé. La machine d'essai est un mouton *Charpy*,
c) un essai de pliage,
d) la mesure de la densité apparente;

2º) — *pour un assemblage soudé bout à bout*

a) un essai de traction sur éprouvette rectangulaire (sans mesure de l'allongement),
b) un essai de pliage.

3º) — *dans les deux cas*, les relevés pratiques de la vitesse de soudure réalisée et du poids d'électrode perdu par volatilisation ou par projection.

On trouvera ci-joint, par exemple le tableau complet des renseignements recueillis sur une marque d'électrode E_2.

Ces résultats sont, en général, transmis aux fournisseurs, ce qui permet à ceux ci de tenir compte des observations faites.

Ainsi, nous avions trouvé pour des électrodes E_3 les résultats généraux suivants:

Métal déposé: $R = 43$ $E = 38$ $A = 48$.

$\alpha = 18^0$ ρ (M) $= 11{,}1$.

Essai sur joint bord à bord: $R = 47$ Kg.

A la suite d'une visite du Directeur de cette maison à notre laboratoire, on nous offrait quelques mois après un nouveau type E_4 qui présentait les caractéristiques suivantes:

Métal déposé: $R = 48,7 \quad E = 40,1 \quad A = 27,9$

$\rho\ (M) = 13.$

Essai sur joint bord à bord: $R = 52,5 \quad \alpha = 132^0.$

On voit que, conjointement à une augmentation de la résistance à la rupture, les autres qualités du joint et surtout sa ductilité ont été notablement améliorées. Le joint à franc bord a été fait sur des tôles à 50 Kg. de résistance à la rupture, mais cette électrode convient fort bien pour les aciers courants type Veritas, à 48 Kg. de résistance maximum et donne avec ces aciers des joints homogènes.

Enfin, il nous parait intéressant, pour montrer les progrès faits en peu d'années dans l'étude des électrodes pour soudure à l'arc, de donner dans le tableau précédant les essais faits à deux époques différentes sur les fournitures d'un même fabricant français.

Les électrodes E_6 sont destinées à la soudure d'un métal qui a les caractéristiques mécaniques suivantes, et qui, d'autre part, a été reconnu comme soudable avec ces électrodes, dans le sens attribué par nous à cette expression

$$R = 60 \quad A = 20 \quad \rho\ (UF) = 6.$$

L'homogénéité du joint pour ce qui est de l'accord entre le métal déposé et le métal de base est aussi bien réalisée que possible. L'essai de soudabilité a montré par ailleurs que cette homogénéité reste suffisante dans les zônes de transition.

On peut donc être assuré que si la mise en oeuvre est adéquate, les assemblages soudés exécutés avec cet acier donneront toute sécurité.

La conclusion de ce rapide exposé, c'est qu'il existe dès maintenant, une gamme de types d'électrodes avec lesquelles on peut réaliser des assemblages homogènes, dont la résistance à la traction varie de 40 à 60 Kg. avec des allongements et des coefficients de résilience comparables à ceux du métal de base.

3º) — *La mise en oeuvre*

a) *Le personnel* — Il nous reste à montrer comment peut être organisé le contrôle de la mise en oeuvre, de telle sorte que la sécurité acquise par le choix des matériaux soit conservée jusqu'à l'achèvement de l'ouvrage.

La principale objection qu'on ait faite à la généralisation de l'emploi de la soudure par fusion est la suivante: La qualité de la soudure dépend essentiellement de l'habileté et de la conscience professionnelle de l'ouvrier soudeur. Quel que soit le soin avec lequel l'Ingénieur aura étudié le tracé des joints, quelques recherches qu'on ait faites pour obtenir, par un choix convenable des matériaux, un assemblage homogène, toutes ces précautions seront inutiles si la soudure est mal exécutée et, comme il n'existe pas de moyen pratique de faire la preuve a posteriori de la bonne ou de la mauvaise exécution, la sécurité qu'on a cru réaliser est illusoire.

Tout d'abord, nous ferons remarquer que cette prétendue impossibilité de vérifier, sur l'ouvrage fini, la qualité de la mise en oeuvre n'est pas spéciale

à la soudure à l'arc. N'en est-il pas ainsi en particulier dans le béton armé et n'est-ce pas par une exécution défectueuse qu'on a expliqué des accidents survenus dans des constructions de cette nature?

D'autre part, il y a quelques années, on pouvait, il est vrai, avoir des doutes les plus sérieux sur les capacités professionelles des ouvriers qui se disaient soudeurs à l'arc.

Mais il n'en est plus de même aujourd'hui.

Il y a, en effet, dans tous les pays de nombreuses écoles de soudure; la plupart d'entre elles dépendent de l'initiative privée et à notre avis, c'est une excellente chose; l'art de la soudure à l'arc est loin d'avoir terminé son évolution; il se transforme et se perfectionne d'année en année et rien ne lui serait plus néfaste à ce point de vue qu'une tutelle administrative. Nous demandons donc, pour la soudure, la maintien de la liberté d'enseignement; nous repoussons aussi l'institution de diplômes plus ou moins officiels qui seraient délivrés aux ouvriers comme consécration de leur passage dans une école.

L'habileté professionnelle, pour tout métier, et plus spécialement peut-être pour la soudure, diminue et finit par se perdre quand elle n'est pas entretenue par l'usage. Les diplômes n'auraient donc de valeur que pour un temps limité et par suite, leur création serait inopérante puisqu'elle ne supprimerait pas la nécessité des essais périodiques que nous estimons indispensables.

Notre école de soudure a été fondée en 1930; les ouvriers qui en sortent exécutent des joints soudés bout à bout et en croix dans les trois positions principales: à plat, verticalement et au plafond. Des éprouvettes de traction sont tirées des pièces soudées et les résultats des essais de traction servent à classer les ouvriers. Ceux qui, pour une position, n'ont pas obtenu un certain minimum, ne sont pas admis à souder dans cette position: cette mesure s'applique particulièrement à la soudure au plafond pour laquelle, entre parenthèses, certains règlements font preuve d'une défiance exagérée: les deux tiers de nos soudeurs sont capables d'exécuter des joints au plafond donnant des résultats équivalents à ceux des joints à plat et, en fait, on exécute couramment de tels joints sur les navires en construction sans que, jusqu'ici, il y ait eu d'incidents à leurs sujet. La réduction du taux admissible imposée aux soudures au plafond est injustifiée; il suffirait de prescrire que ces soudures seront exécutées uniquement par les ouvriers soudeurs ayant prouvé, par des essais de qualification, leur aptitude à les réaliser correctement.

Le minimum exigé pour le classement était à l'origine 35 Kg. pour l'essai bout à bout, et 28 Kg. pour l'essai en croix. Par suite de l'amélioration de qualité des électrodes, ce minimum a été relevé et il est maintenant, avec l'électrode E_6 et des tôles d'acier à 50 Kg., 46 Kg. pour l'essai bout à bout et 33 Kg. pour l'essai en croix.

Le séjour à l'école de soudure varie entre six semaines et deux mois; il serait absurde de prétendre que ce laps de temps relativement court suffit à la formation complète du soudeur. Celui-ci continuera à se faire la main pendant les premiers mois d'exercice de sa nouvelle profession; on peut dire que, d'apprenti il est passé compagnon mais il n'est pas devenu maître.

Il sera donc d'une prudence élémentaire de ne lui confier, au début que des travaux n'intéressant pas la sécurité de l'ouvrage et, d'autre part, de suivre les

progrès qu'il peut faire et qui seront peut-être négatifs, par des essais de contrôle à des intervalles assez fréquents. Nous avions d'abord adopté le principe consistant à renouveler tous les trois mois pendant la première année, les essais de classification. L'expérience a montré qu'on pouvait adopter un intervalle un peu plus long et, maintenant, ces essais ont lieu tous les quatre mois.

Au bout d'un an, l'ouvrier qui a maintenu sans défaillance sa capacité professionelle peut inspirer confiance et on le charge de travaux d'importance correspondant à sa classe mais on continue à vérifier qu'il ne perd pas la main et on ne supprime pas les essais périodiques; on se borne à en augmenter la période en les exigeant tous les six mois.

Par cette méthode, le personnel est maintenu en haleine et il s'établit entre les soudeurs une émulation profitable à la fois aux ouvriers et à leurs employeurs.

Voici à titre de renseignement, un tableau résumant les essais successifs d'ouvriers formés dans notre école.

Résistance à la rupture de joints bout à bout

Nos de marron:		38.022	38.027	38.049	38.050	38.098
Essais de sortie	H	39.4	41.1	49.9	48.9	38.0
	V	34.8	35.7	45.8	45.5	31.4
	T	36.4	35.7	43.0	45.8	20.5
1/er essai trimestriel	H	47.9	42.0	49.9	44.5	39.4
	V	39.1	38.1	45.3	45.3	41.9
	T	40.6	30.9	39.5	40.9	39.0
2/ème essai semestriel	H	44.1	37.2	46.5	44.6	41.1
	V	38.6	40.8	40.8	42.2	45.9
	T	34.7	35.2	31.1	45.6	44.2
3/ème essai trimestriel	H	44.4	43.5	47.6	45.7	45.4
	V	43.5	42.3	42.6	41.2	42.3
	T	43.8	36.1	47.2	42.0	47.6
1/er essai semestriel	H	45.6	40.7	48.7	46.9	46.6
	V	41.6	43.3	44.8	44.1	43.5
	T	45.6	42.4	44.2	44.0	41.2
2/ème essai semestriel	H	47.1	41.8	45.6	49.1	41.8
	V	40.2	42.8	44.8	44.6	42.1
	T	45.3	38.0	46.0	44.4	41.8

Tous ces essais ont été effectués avec les mêmes électrodes dont le métal d'apport avait une résistance minimum à la rupture de 40 Kg. par mm^2 et sur des tôles de qualité courante. Depuis un an environ, on emploie des électrodes donnant un métal d'apport à résistance plus élevée et des tôles de base de qualité correspondante et contrôlée.

Le dernier essai effectué dans ces conditions par les soudeurs ci-dessus a donné les résultats suivants:

H	55,3	64,9	58,4	62,9	54,3
V	55,8	73,0	57,0	57,3	46,5
T	59,8	70,0	57,9	63,2	59,1
Métal de Base	50 kg	60 kg	50 kg	60 kg	50 kg

L'examen des chiffres de ce tableau montre que, si un ouvrier de l'école peut exécuter convenablement des joints à plat ce n'est guère qu'après un an de pratique qu'il arrive à faire d'une façon constante des joints verticaux ou au plafond.

Il prouve également l'intérêt capital que présentent au point de vue de la sécurité, les essais périodiques que nous avons institués dès la fondation de notre école. Il en résulte incontestablement une augmentation des frais généraux de l'atelier, mais nous y trouvons une assurance contre les accidents qui pourraient résulter de soudure défectueuses, et nous estimons qu'aucun industriel ne devrait être admis à exécuter par soudure des travaux intéressant la sécurité publique, s'il ne justifie pas de l'existence, depuis au moins un an, d'une organisation semblable. Les prescriptions des cahiers des charges qui imposent seulement des essais individuels au commencement du travail ne donnent pas une garantie suffisante.

b) *Le matériel*

Nous venons de voir comment on peut former et maintenir un personnel soudeur apte à exécuter les travaux les plus variés. Pour lui permettre de tirer un bon parti de son habileté professionnelle il faut mettre à sa disposition un outillage approprié; la partie fondamentale de cet outillage est celle qui assure la distribution du courant de soudure. Il serait hors de propos d'étudier ici les divers procédés utilisés pour cette distribution et les conditions qui doivent être réalisées pour assurer une soudure correcte. Nous nous bornerons à rappeler que l'une des plus importantes de ces conditions est le bon réglage de l'intensité. Il est donc indispensable, à notre avis, que chaque soudeur ait à sa portée un ampèremètre en série sur l'électrode: les indications de cet ampèremètre ne serviront pas seulement à l'ouvrier pour choisir l'intensité convenable d'après les instructions qu'il a reçues; elles permettront au contremaître de vérifier facilement et rapidement si chacun des soudeurs qu'il dirige se conforme à ces instructions; elles fournissent donc, sur la bonne exécution du travail, un renseignement direct et permanent et c'est là la seconde réponse que nous faisons à l'objection que nous avons citée plus haut contre la généralisation de la soudure à l'arc dans la construction métallique. Non seulement le choix de la main-d'oeuvre de soudure est fait avec une méthode qui ne se retrouve dans aucune autre profession, mais encore l'un des éléments les plus importants de la mise en oeuvre peut être, à tout instant contrôlé.

Nous utilisons deux modes de distribution de courant. Dans l'un deux, chaque ouvrier soudeur dispose d'un ensemble convertisseur alimenté en énergie par un réseau à 440 v et fournissant le courant à basse tension propre à la soudure. Nous avons tenu à ce que chacun de ces convertisseurs soit muni, non seulement

de l'ampèremètre dont nous venons de parler, mais également d'un voltmètre. Celui-ci ne peut évidemment être consulté par le soudeur, mais il fournit au contremaître une indication très utile sur la conduite du travail.

Dans le second mode de distribution, il existe, sur une zône couvrant trois cales de construction et deux postes d'achèvement à flot une canalisation à basse tension alimentée par une centrale qui transforme le courant du secteur, alternatif à 5000 volts, en courant continu à 45 volts. Les sections de la canalisation ont été calculées pour que la tension minimum y soit de 35 volts. Chaque ouvrier soudeur peut placer, en un point quelconque de la canalisation, une prise de courant spéciale appelée régulateur, qui contient des résistances servant non seulement à régler l'intensité du courant de la dérivation, mais aussi à fournir, à l'allumage de l'arc et à chacun des courts circuits quasi instantanés que révèlent les oscillogrammes du courant de soudure un supplément de tension de 20 à 25 volts. La stabilité de l'arc est ainsi parfaitement assurée. Sur chaque régulateur est placé un ampèremètre, mais il n'y a pas de voltmètre parce que le régulateur est sur un pôle seulement; la ligne de retour est directe de la pièce à souder à la canalisation fixe.

Les résultats obtenus avec ce mode de distribution, qui a fait l'objet d'un article publié par le journal *La Technique Moderne*, le 1/er Juin 1932, ont été assez satisfaisants pour qu'une nouvelle Centrale, desservant une autre zône de notre Chantier, ait été créée et mise en service en 1935.

4º) — *Essais sur des assemblages soudés*

Nous aurions voulu montrer, par des résultats numériques d'essais effectués sur des constructions soudées, que les méthodes décrites dans les pages qui précèdent donnent bien la sécurité en vue de laquelle elles ont été instituées, mais nous n'avons guère, jusqu'ici, appliqué ces méthodes que pour des coques de navire et il n'est pas fait, sur ce genre de travaux, d'essais positifs à l'achèvement. C'est seulement au bout d'un certain temps de service, et dans des circonstances de navigation plus ou moins défavorables, qu'on peut, par l'absence de déformations ou de ruptures locales juger de la valeur du travail.

Il faut donc nous borner à rappeler que la presse a rendu compte, il y a environ un an, des essais du croiseur «*Emile Bertin*», livré par notre Chantier à la Marine Française, et pour la construction duquel il avait été fait un large emploi de la soudure. Certains de ces essais ont été effectués par très grosse mer et, néanmoins, aucun assemblage soudé n'a montré ni trace de fatigue ni défaut d'étanchéité. Après six mois de navigation d'hiver dans l'Atlantique, l'examen de la coque de l'«*Emile Bertin*» a donné lieu aux mêmes constatations favorables.

Sur le paquebot «*Normandie*», il a été exécuté un grand nombre d'assemblages soudés, puisqu'à certains moments le nombre des soudeurs occupés à bord de ce navire a atteint 140; mais d'une part les travaux n'intéressaint pas les oeuvres vives et, d'un autre côté, la mise en service de «*Normandie*» est trop récente pour qu'on puisse formuler des conclusions.

Nous nous permettons donc, bien que ce genre de travaux ne rentre pas dans l'objet direct du Congrès, de donner quelques observations faites au cours de la soudure à l'arc de pièces mécaniques. Il s'agit d'ailleurs de la soudure bout

à bout de tôles épaisses et des soudures de ce genre peuvent trouver place dans la charpente métallique, pour des semelles de pont par exemple.

Le premier cas que nous allons citer est celui de la soudure d'une plaque de fondation formée de deux tôles de 20 mm d'épaisseur, ayant une résistance à la rupture de 60 Kg/mm^2.

La plaque était placée horizontalement et ne pouvait être retournée en cours de travail. Comme l'épaisseur conduisait à adopter un joint en X, il en résultait la nécessité d'exécuter la moitié du joint à plat, pour le dessus de la plaque, et au plafond pour le dessous.

Le travail fut conduit de la manière suivante. Les deux tôles à réunir furent chanfreinées sur les deux faces à l'angle de 60°, puis disposées parallèlement en laissant un vide de 5 mm entre les deux saillies des chanfreins.

Un fil de cuivre de 10 mm de diamètre fut posé dans le chanfrein inférieur et on déposa un premier cordon de soudure, à plat. L'électrode employée avait un diamètre de 6,4 mm. C'était l'électrode dénomée plus haut E_6: elle est à fort enrobage et cette circonstance a conduit à mettre le pôle + à l'électrode, le pôle — à la pièce, contrairement à notre pratique courante.

Une fois déposé le cordon N° 1, on le burine par dessous pour faire disparaître les irrégularités et défauts de surface dus au contact de l'air pendant le dépôt, malgré la présence du fil de cuivre, et un cordon symétrique N° 2 fut déposé sur toute la longueur du joint, celui-ci par dessous et par suite au plafond.

Les cordons suivants furent alors déposés par dessus et par dessous, par deux soudeurs travaillant simultanément et règlant leur avance de manière à se trouver sensiblement sur la même verticale.

Le dépôt du cordon se faisait en balançant l'électrode de droite à gauche et de gauche à droite, de manière à obtenir des stries perpendiculaires à l'axe du joint au lieu de stries parallèles. On est arrivé ainsi à réduire considérablement l'influence du retrait.

Le contrôle après exécution a été fait de deux façons: des appendices laissés à chaque bout du joint furent soudés de la même façon et en même temps que le joint, et on y préleva les éprouvettes d'essai ordinaires.

Les essais mécaniques de ces éprouvettes donnèrent les résultats suivants:

$R = 61$ Kg. 5

Angle de pliage (sans criqûre) 118° [1]

ρ (UF) = 7,6.

D'autre part, l'examen de la soudure elle-même aux rayons X fut fait sur toute sa longueur afin de rechercher et de faire disparaître, s'il y avait lieu, les défauts locaux.

L'appareil que nous possédons pour ces essais radiographiques est de la marque *Phillips*. Il permet d'obtenir entre anode et cathode une tension de 180 Kv. et on peut obtenir des radiographies satisfaisantes pour une épaisseur atteignant 90 mm d'acier.

Nous donnons une reproduction d'un des positifs obtenus dans l'étude de la plaque en question. Les cercles blancs qu'on voit sur cette reproduction servent

[1] — L'essai fut arrêté lorsque l'allongement de la fibre tendue eut atteint le minimum fixé par le Cahier des Charges.

de repères pour reporter la radiographie sur la plaque et retrouver la position du défaut. On notera que, pour avoir cette position dans l'espace, il est nécessaire de posséder deux radiographies prises avec des faisceaux de rayons ayant des axes différents.

Le second exemple que nous allons donner est celui de la soudure, toujours bord à bord, de tôles sensiblement plus épaisses que les précédentes et dont les caractéristiques mécaniques étaient les suivantes:

$$A = 49{,}6 \qquad R = 27{,}8 \qquad \rho \text{ (Mesnager)} = 14$$

L'épaisseur atteignait 55 mm; des tôles aussi fortes ne seront vraisemblablement pas utilisées dans la charpente métallique, mais les observations qui vont suivre peuvent avoir leur intérêt pour des tôles un peu moins épaisses, 25 à 30 mm par exemple.

Avant de commencer l'exécution proprement dite, des études expérimentales furent entreprises sur des coupons de tôle mesurent 600 × 300 mm et qui furent soudés bord à bord.

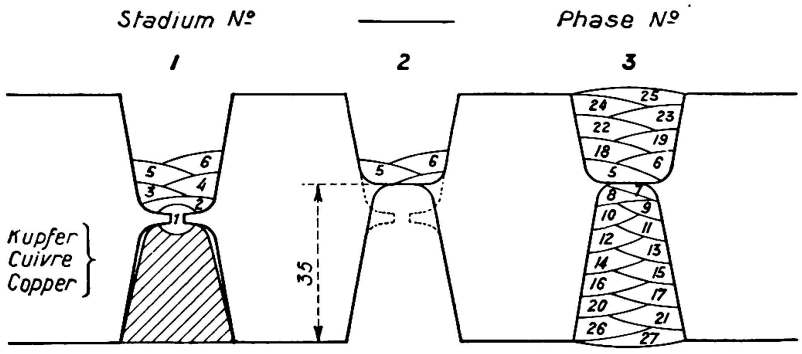


Fig. 7.

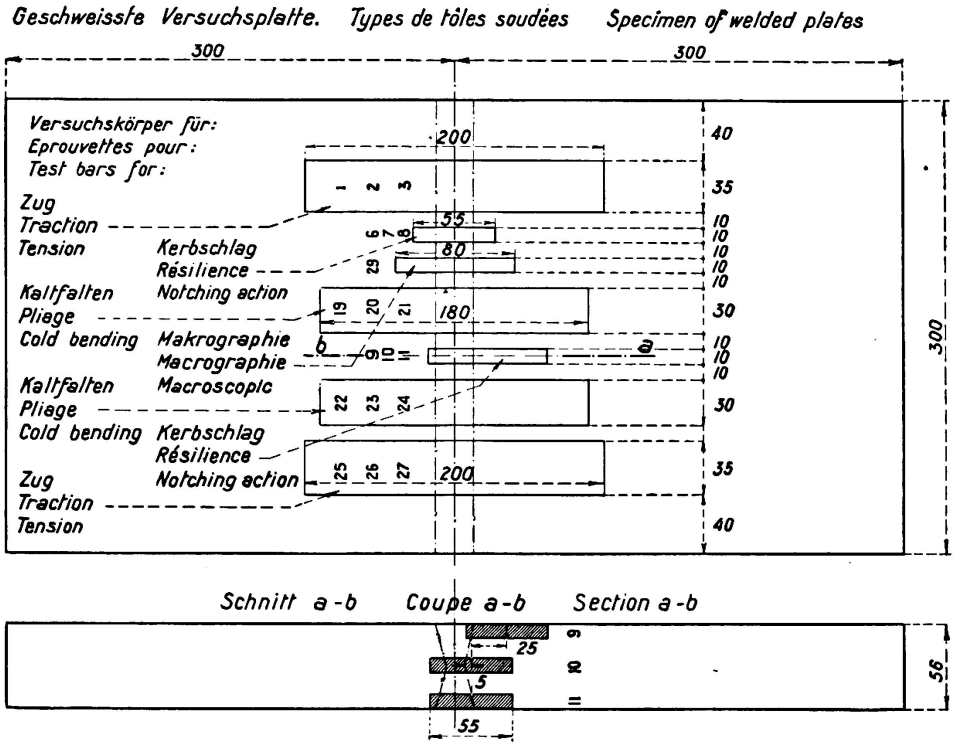


Fig. 8.

En raison de l'épaisseur, le profil du chanfrein adopté était formé de deux U accolés par la base (fig. 7). L'électrode employée était la même que dans le cas précédent. La succession des passes, l'intensité et la tension du courant étaient réglées, au début, par le tableau ci-dessous:

Diamètre des électrodes	Ordre des passes	T amp.	V volts
3,25	1	80	24—26
4	2, 3, 4, 5	180	24—26
5	6 à 17	230—240	20—24
6,4	18 à 29	320—350	20—24

Pour exécuter la première passe, on plaçait, dans la moitié inférieure du joint, une bande de cuivre rouge; les cordons étaient tous exécutés à plat, en retournant la pièce chaque fois qu'il était nécessaire. Entre le cordon N° 3 et le cordon N° 4, il a été procédé à un burinage du cordon N° 1 pour enlever la partie superficielle de celui-ci, qui avait été exécutée au contact de l'air, malgré la présence du cuivre, et n'accrocher le cordon N° 4 que sur une surface parfaitement saine.

Malgré cette précaution, les essais mécaniques exécutés sur des éprouvettes prises les unes à la surface du joint, les autres au milieu et contenant, par suite, la passe N° 1, ont montré une différence sensible de ductilité entre la surface et le centre de la soudure, ce qui conduisit à adopter un procédé un peu différent.

On exécuta, sans burinage préalable, les passes N°s 1 à 6 inclusivement, puis on enleva tout le métal correspondant aux passes 1 à 4, y compris le métal de base au voisinage de la partie étranglée, comme l'indique le croquis (fig. 7) et on procéda ensuite au dépôt des passes N° 7 et suivantes. La pièce subit ensuite une opération de revenu à 640°, pendant 2 heures 15 minutes (une heure pour 25 mm d'épaisseur).

On découpa ensuite des éprouvettes de traction et de résilience, les unes à la surface de la pièce, les autres au milieu de l'épaisseur; la fig. 8 donne la répartition de ces diverses éprouvettes.

Cette méthode donna des résultats tout-à-fait satisfaisants comme l'indique le tableau ci-après:

Traction						Pliage			Résilience		
Repères	Dimensions des éprouvettes	Section mm²	Charges de rupture totales	Charges de rupture mm²	Charges de rupture moyennes	Repères	Angles de pliage	A °/₀ fibre extr. sur 20 mm	Repères	ρ Mesnager	Moyenne
1	19.8×13.6	270	12 800	47.4					7 F_1	15.4	
									7 F_2	12.4	14.4
3	18.6×13.6	254	12 100	47.6		20	130°	38	7 F_3	15.4	
					47.9						
25	19.5×13 6	266	12 800	48.1		23	107°	36	7 F_4	14	
									7 F_5	14	14
27	19.8×13.7	272	13 300	48.8					7 F_6	14	

L'examen aux rayons X ne fit apparaitre aucun défaut appréciable, nous donnons la reproduction d'une des radiographies prises à l'occassion de ces essais.

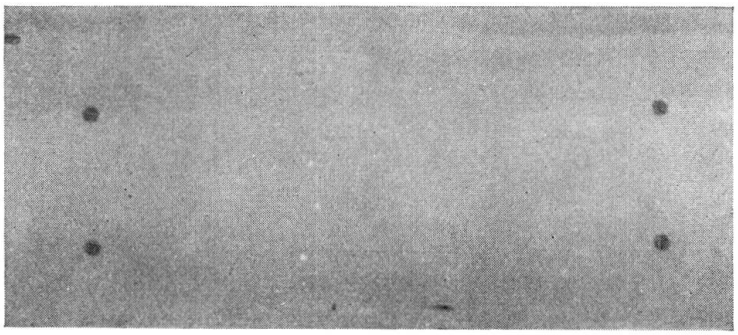


Fig. 9.

Radiographie d'une soudure bout à bout entre deux tôles de 20 mm.

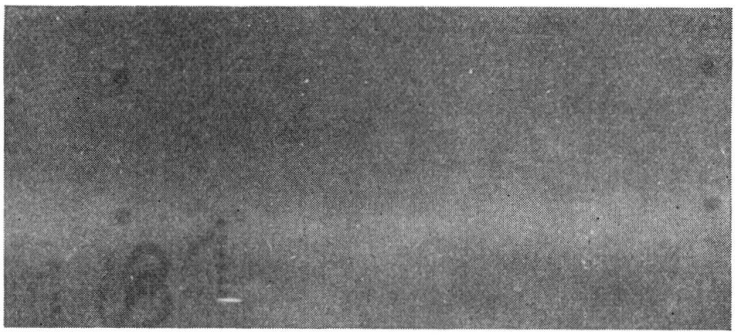


Fig. 10.

Radiographie d'une soudure bout à bout entre deux tôles de 55 mm.
La soudure est comprise, dans chaque cas, entre les grands côtés du rectangle formé par les quatre points noirs.
La marque de contrôle du Bureau Veritas apparaît au bas à gauche de la deuxième radiographie.
La différence de teinte des deux radiographies s'explique par la différence des épaisseurs.

5º) — *Conclusions*

L'expérience acquise dans l'emploi de la soudure à l'arc pour des travaux de nature très diverse permet d'affirmer que, moyennant une bonne organisation du contrôle des matériaux et de la mise en oeuvre ce mode d'assemblage donne une sécurité aussi complète que d'autres méthodes de construction comme le rivetage ou le béton armé. Il faut toutefois faire une réserve. Les essais que nous avons faits jusqu'ici sont des essais statiques ou des essais de choc. Il aurait fallu les compléter par des essais de fatigue sous charges variables. Bien que nous ayions ajouté à notre laboratoire un pulsateur Amsler qui permet de faire des essais, nous n'en avons fait jusqu'ici qu'un nombre très restreint.

L'examen radiographique peut, dans une certaine mesure suppléer à l'essai de fatigue car il décèle les défauts locaux comme les soufflures ou les inclusions qui n'auraient qu'une faible influence sur la résistance aux essais statiques mais seraient cause de rupture prématurée sous des charges alternées. On ne peut

donc que le conseiller quand il est pratiquement possible. Mais son emploi parait difficile à généraliser tout au moins pour la construction métallique. L'appareil est ralativement lourd et encombrant; il faut prendre des précautions sérieuses pour mettre le personnel à l'abri des rayons secondaires. Enfin, et surtout, les radiographies des pièces présentant des différences d'épaisseurs sensibles manquent de netteté, par suite de la présence des mêmes rayons secondaires. Il est donc à peu près impossible de radiographier avec ces rayons, un assemblage de pièces en croix. On y arrive en employant les rayons γ mais le coût de l'installations et les dangers que présentent ces rayons pour le personnel, les rendent inutilisables dans l'industrie courante.

Nous n'avons pas cru devoir parler dans ce rapport des recherches, d'ailleurs peu nombreuses, que nous avons faites sur le retrait. Elles n'avaient d'ailleurs pas pour but de déterminer les tensions résiduelles dues au retrait, mais seulement les changements de dimensions et de forme qui pouvaient en résulter pour les éléments de la charpente d'un navire et la méthode à suivre pour les corriger par avance. Nous nous sommes donc bornés à relever les déformations d'ensemble après refroidissement complet, ce qui ne permet pas d'évaluer avec certitude les tensions résiduelles.

Résumé.

Dans un atelier de soudage, on peut créer d'emblée une organisation de contrôle qui offre toute sécurité. Le contrôle peut être complété dans des cas spéciaux par des radiographies. Il semble toutefois que l'on ne peut pas généraliser l'emploi des rayons Roentgen.

Leere Seite
Blank page
Page vide

III c 3

Essai des soudures.

Prüfung der Schweißnähte.

Testing of Welds.

R. Berthold,
Leiter der Röntgenstelle beim Staatl. Materialprüfungsamt, Berlin-Dahlem.

Deux faits caractérisent le développement du contrôle des soudures depuis le 1er Congrès international de l'A.I.P.C.:

L'application des essais de résistance à la fatigue et l'introduction de méthodes de contrôle sans détérioration, spécialement de la radiographie. Les deux faits ont la même origine.

A. — *Les essais de résistance* à *la fatigue.*

Alors que pour les essais statiques (essais de traction, de pliage, de résilience) il existe dans beaucoup de pays et particulièrement en Allemagne des directives et des normes qui s'occupent de la question de la forme et des dimensions des éprouvettes et des installations d'essai, ces précisions font fortement défaut pour les essais de résistance à la fatigue. En Allemagne il n'existe que la norme DIN 4001, dans laquelle d'une part sont déterminés les principes pour l'essai de résistance à la fatigue et dans laquelle d'autre part est fixée pour la résistance aux oscillations la contrainte limite pour laquelle l'éprouvette peut encore juste supporter 2 millions d'oscillations de la charge.

A ce sujet il existe encore les prescriptions de la Compagnie des Chemins de fers allemands pour les ponts à âme pleine soudés, dans lequelles sont prescrites pour l'acier St. 37 et l'acier St. 52 certaines valeurs de résistance aux oscillations pour les éprouvettes de dimensions et de formes déterminées, à l'état travaillé et non travaillé, ainsi que pour les soudures longitudinales et transversales. Par exemple ces normes prescrivent: pour des soudures transversales non travaillées, en acier St. 37 et St. 52, des valeurs de résistance aux oscillations de 15 et 16 kg/mm^2, pour des soudures travaillées des valeurs de résistance aux oscillations de 18 et 19 kg/mm^2. Il n'est pas encore certain que ces prescriptions des Chemins de fer allemands deviendront une norme générale DIN.

Toutes les autres prescriptions concernant les essais sur les sollicitations à la fatigue sont encore en préparation.

L'exécution des essais de résistance à la fatigue a montré qu'en partant des valeurs de résistances déterminées sur les soudures d'essai pour une sollicitation statique, on ne pouvait tirer aucune conclusion sur la résistance à la fatigue de ces éprouvettes et moins encore des ouvrages eux-mêmes. *Thum* dit, dans les directives pour la conformation constructive des éléments de machine soudés

(Richtlinien für die konstruktive Durchbildung geschweißter Maschinenteile), qu'une bonne résistance à la rupture, qu'un fort allongement et qu'une bonne résistance à l'essai de résilience ne garantissent pas du tout une haute résistance à la fatigue car, dans le cas d'une surcharge souvent répétée, le matériau est sollicité autrement que dans le cas d'une surcharge permanente. *Bierett* demontre ailleurs (1)[1] que les rapports d'irrégularité sont beaucoup plus importants pour la résistance à la fatigue d'un assemblage soudé que les propriétés de qualité du métal d'apport.

On obtient donc que, dans les cas de sollicitation à la fatigue, la rupture se produit toujours là où il y a la plus grande intensité de lignes de force. Cela signifie que les influences qui ne sont pas si importantes pour les sollicitations statiques: traces de scories, fautes à la racine, fautes de liaison, irrégularités résultant du chauffage, transition en boudin, pores, etc. à côté de la déformation des assemblages soudés, jouent maintenant un rôle prépondérant pour la résistance à la fatigue d'un assemblage soudé.

Ce fait engendre la nécessité urgente d'un contrôle qui permette de déterminer l'état de la soudure dans l'ouvrage terminé, contrôle qui ne peut être possible que par un moyen qui n'entraine aucune détérioration.

Avec la radiographie qui s'est aussi développée depuis 1923 pour les domaines d'application technique, l'art de la soudure pouvait disposer d'un procédé fondamentalement approprié et n'entrainant aucune détérioration.

B. — *La radiographie des soudures.*

1° *Principes généraux.*

Les principes généraux de la radiographie ont été souvent décrits dans la littérature (2) et nous les supposerons connus.

2° *Le contrôle à écran.*

L'écran moderne est constitué d'une couche de sulfide de zinc qui, suivant l'intensité des rayons X qui la traversent, devient plus ou moins clair. La possibilité d'investigation avec l'écran possède des limites (3) car la luminosité et la netteté que l'on peut atteindre ne sont pas suffisantes pour pouvoir distinguer de petites différences de clarté. Par exemple les pores d'une épaisseur d'acier de 10 mm doivent avoir au moins un diamètre de 0,6 mm, afin de pouvoir être encore juste distingués. Le contrôle de fissures fines ou de fautes de liaison est tout-à-fait incertain, de telle sorte que le contrôle avec écran n'est approprié qu'au contrôle rapide des travaux exécutés lors de l'apprentissage des soudeurs et qu'au décelage de fautes grossières aussitôt après l'exécution de la soudure.

3° *Radiographies sur film, avec et sans écran amplificateur.*

Les meilleures possibilités d'investigation exigent, avec et sans écran amplificateur, un film à double revêtement. Les écrans amplificateurs se composent de couches de wolframate de calcium qui sont comprimées des deux côtés du film et qui, sous l'effet des rayons X, sont faiblement éclairées.

L'application de ces couches amplificatrices permet de reduire très sensiblement les temps d'éclairage; cependant il se produit en même temps une réduction

[1] cf. Nomenclature de la littérature.

de la netteté qui, pour de faibles épaisseurs de métal, diminue fortement la qualité de l'image. Des investigations sur l'influence des écrans amplificateurs (4) sur le décèlement des fautes ont conduit à la détermination de valeurs d'essai appropriées, qui sont données à la fig. 1. On peut en tirer que pour obtenir le meilleur décèlement des fautes, il faut travailler sans écran jusqu'à une épaisseur d'acier maxima de 10 mm, de là jusqu'à 35 mm d'épaisseur avec un écran précis avec effet d'amplification restreinte et au dessus de cette épaisseur avec un écran non précis mais amplifiant fortement.

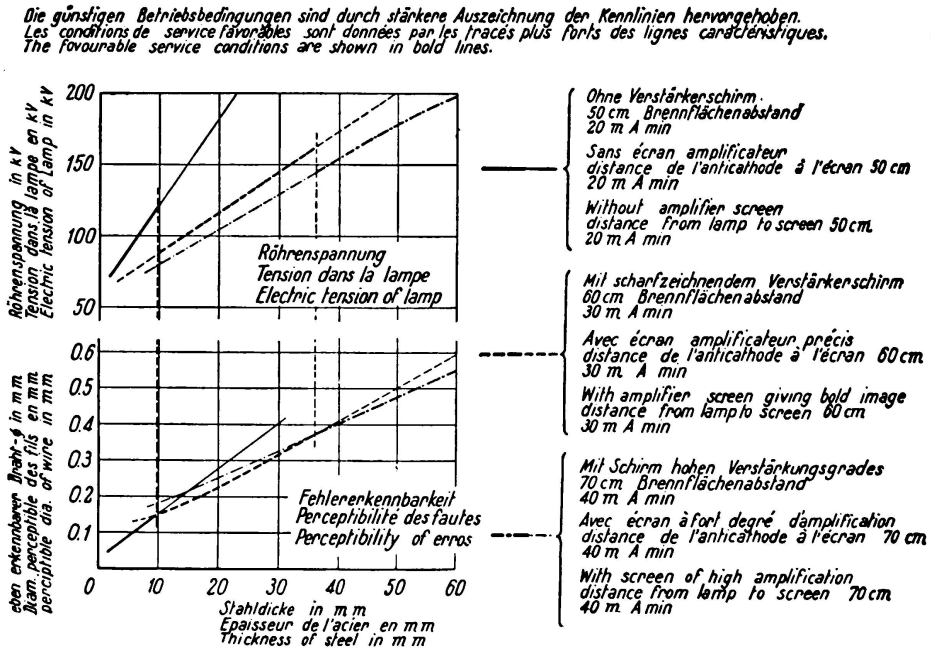


Fig. 1.

Valeurs de services pour la radiographie de l'acier.

La percevabilité des fautes, donnée à la fig. 1, mesurée à des baguettes environ circulaires posées sur la tôle et photographiées ne peut pas être obtenue lors du contrôle de la fissuration. Par suite de l'extension spatiale de la tache focale des lampes à rayons X, il se produit un surrayonnement de l'endroit défectueux qui conduit à l'apparition de zones de demiombre et par conséquent à une réduction des contrastes sur le film. C'est pourquoi le contrôle des fissures fines a des limites; leur contrôle ne sera pas certain lorsque la radiographie de la fissure ne se fait pas dans le sens de sa plus grande profondeur. Le tableau 1 montre l'influence de l'angle formé par les rayons et la direction de la fissure sur la largeur de fissure perceptible:

Tableau 1.

Largeur minima de fissure qui peut être perçue aux rayons X, en fonction de l'angle entre la direction de la fissure et celle des rayons (40 mm d'acier, 6 mm de hauteur de fissure).

angle en °	5	8	10	15	20	30	60	90
largeur de fissure mm	0,03	0,06	0,09	0,13	0,16	0,21	0,32	0,40

On rencontre certaines difficultés dans l'investigation des soudures d'angle par suite de la variation d'épaisseur dans la direction de la radiographie; il est possible de surmonter cette difficulté en plaçant à côté de la soudure d'angle un coin d'étain dont l'épaisseur variable contrebalance l'épaisseur variable de la section à radiographier (5).

4° *Prescriptions.*

Depuis le moment où le contrôle aux rayons X n'était plus réservé aux instituts de recherches, mais s'était développé dans les ateliers, il était nécessaire de publier des *Prescriptions pour le contrôle des soudures au moyen des rayons X* (DIN 1914, établies par l'Association allemande pour l'essai des matériaux et par la Commission professionelle pour la soudure du VDI). Leur but est d'obtenir dans toutes les institutions qui s'occupent de rayons X des radiographies que l'on puisse apprécier uniformément, afin de préparer ainsi les bases pour une réception ordonnée. C'est pourquoi il est entre autre prescrit qu'une éprouvette de baguettes de différents diamètres soit posée sur la soudure et radiographiée en même temps. On exige la percevabilité de certains diamètres de baguettes, en fonction de l'épaisseur de la tôle. Le tableau 2 donne un résumé des éprouvettes employées en Allemagne et la fig. 2 montre la radiographie d'une telle éprouvette.

Tableau 2.

Séries de baguettes, d'après DIN 1914 pour le contrôle de la qualité des radiographies. (Chaques série se compose de 7 baguettes serrées dans du caoutchouc).

Métal de l'éprouvette	Epaisseur de l'éprouvette en mm	Métal et désignation de la série de baguettes	Diamétre des baguettes en mm	Désignation des séries: bille de plomb sous les baguettes	Couleur de l'enveloppe de caoutchouc
Métaux légers	0 bis 50	Al I	0,1/0,2/0,3 . . 0,7	• •	gris
	50 „ 100	Al II	0,8/1,0/1,2 . . 2,0	• • •	
	100 „ 150	Al III	1,5/2,0/2,5 . . 4,5	• • • •	
Alliages de fer	0 bis 50	Fe I	0,1/0,2/0,3 . . 0,7	• • •	noir
	50 „ 100	Fe II	0,8/1,0/1,2 . . 2,0	• • • •	
	100 „ 150	Fe III	1,5/2,0/2,5 . . 4,5	• • • • •	
Alliages de cuivre	0 bis 50	Cu I	0,1/0,2/0,3 . . 0,7	• • • •	rouge
	50 „ 100	Cu II	0,8/1,0/1,2 . . 2,0	• • • • •	
	100 „ 150	Cu III	1,5/2,0/2,5 . . 4,5	• • • • • •	

On n'a pas accepté les éprouvettes prescrites par le «Boyler-Code» américain car elles ne permettent pas de préciser la percevabilité des fautes dans la zone des passes de soudures. Ces éprouvettes étaient constituées par des plaques d'acier avec entailles de différentes profondeurs ou par un filtre gradué avec forages.

Les prescriptions allemandes donnent encore une série d'instructions sur la direction des rayons, la disposition des prises de vue et les moyens auxiliaires pour le contrôle de différents profils de soudures.

En liaison avec la préparation de ces prescriptions, l'Association allemande pour l'essai des matériaux et la Société allemande de radiographie fixèrent de *nouvelles dimensions* pour les films de radiographie. Comme les seules dimensions en usage jusqu'alors, basées sur les besoins des investigations médicales, n'étaient pas appropriées au contrôle des soudures, chacun devait d'abord couper ces films suivant la grandeur voulue. Actuellement, par suite d'entente entre les expérimentateurs de ce procédé et les fabricants de films, de feuilles amplificatrices et de cassettes, il est possible de se procurer dans le commerce des films de 6 cm × 24 cm, 6 cm × 48 cm, 6 cm × 72 cm et 10 cm × 24 cm, 10 cm × 48 cm, 10 cm × 72 cm.

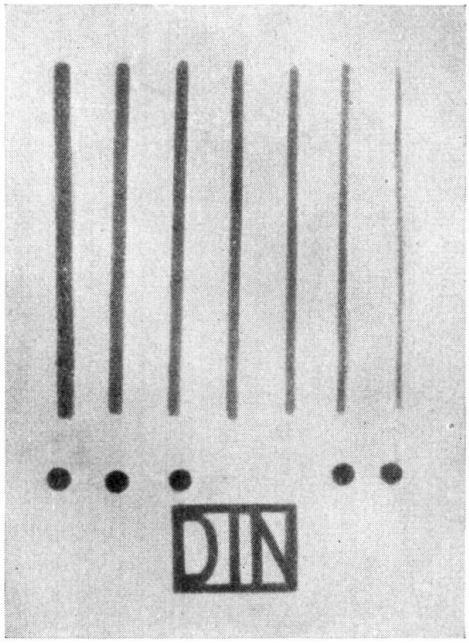


Fig. 2.
Radiographie (copie positive) d'une série de baguettes Cu II.

C'est en 1929 et 1930 que l'on a déjà établi des prescriptions sur l'exécution des installations de radiographie au point de vue de la protection contre les rayons à haute tension (DIN Rönt. 5 et 6) (6).

5° *Auxiliaires techniques.*

L'application de la radiographie aux grandes poutres de ponts et de halles dans les ateliers de construction, et plus encore son application sur le chantier lui-même, influencèrent fortement le genre et la conformation des auxiliaires techniques.

Les caractéristiques des installations modernes de radiographie à l'atelier sont les suivantes: a) sécurité contre le contact avec les éléments sous haute tension, b) protection contre les rayons, c) mobilité du réservoir contenant la lampe à rayons X et d) portabilité des différentes pièces.

Ces exigences furent remplies finalement avec l'accord complet de divers fabricants par les mesures suivantes:

a) Les pièces conduisant le courant à haute tension sont dans des conduites métalliques goudronnées.

b) On n'utilise exclusivement que les lampes à rayonnement dirigé desquelles

ne peut sortir qu'un faisceau rayonné étroitement limité (fig. 3). Tous les autres rayons partant de la tache focale dans tous les sens sont interceptés par une enveloppe métallique épaisse.

c) Entre le transformateur à haute tension et la lampe il y a des câbles mobiles à haute tension d'env. 10 m de longueur de telle sorte que la lampe est tout-à-fait indépendante de l'installation et peut être facilement mise en place.

d) Afin de rendre les installations transportables, depuis 1932 on a scindé le transformateur à haute tension en deux moitiés symétriques de telle façon que les pièces d'une installation à 200 kW ne dépassent pas le poids de 90 kg. Afin de réduire encore le poids, les condensateurs nécessaires à l'installation sont placés dans les câbles à haute tension eux-mêmes (Siemens & Halske A.-G.).

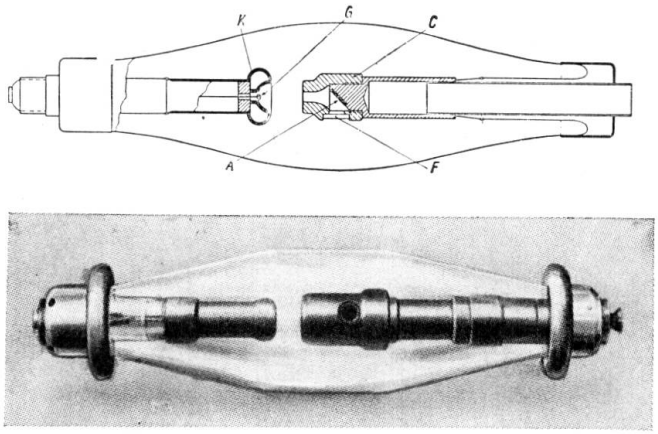


Fig. 3.

Coupe (a) et vue (b) d'une lampe à rayons X pour 200 kW de tension en service dans l'huile.

F) fenêtre en béryllium pour la sortie des rayons.
A) plaque d'anode en wolfram.
C) bloc de wolfram-cuivre.
K) cathode.
G) fil incandescent.

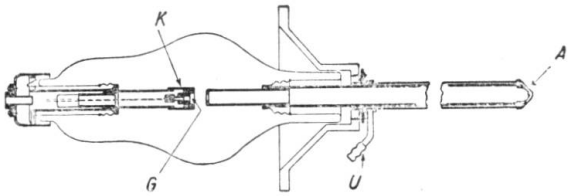
Les mesures que nous venons de décrire ont amené la construction, en Allemagne, d'installations de radiographie dont l'emploi s'est révélé excellent, à l'atelier et sur le chantier, par trois ans d'expérience.[2]

La construction des lampes fut tout spécialement influencée par les besoins de la pratique. On construisait des lampes relativement courtes pour 200 et 250 kW pour le service dans l'huile afin d'économiser la longueur d'isolation et par conséquent de réduire le poids (fig. 3). Mais comme ces lampes ne permettaient pas toujours une investigation économique (principalement dans le cas des soudures circulaires appliquées sur des tuyaux ou des réservoirs), on développa dernièrement des lampes à anode creuse (Siemens & Halske A.-G.), dans lesquelles les électrons arrivent sur l'anode sphérique par un canal étroit, rassemblés par une bobine collectrice. Les électrons sont donc freinés à l'intérieur de la lampe; les rayons X qui en résultent s'échappent dans tous les sens à travers la paroi de la lampe. On a ainsi de nouvelles possibilités pratiques d'investigation pour le contrôle des soudures (fig. 4).

[2] Constructeurs allemands d'installations de radiographie: *C. H. F. Müller-A.G.*, Hamburg — *Koch & Sterzel-A.G.*, Dresden — *R. Seifert & Co.*, Hamburg — *Siemens & Halske-A.G.*, Berlin.

L'emploi de la radiographie sur le chantier exigeait aussi de nouvelles cassettes et de nouvelles fixations. D'après une proposition de la «Centrale de radiographie» (Röntgenstelle) on utilise actuellement dans le contrôle des soudures des cassettes de caoutchouc dans lesquelles on peut faire le vide; elles se composent de tuyaux de caoutchouc qui, après application des feuilles amplificatrices et des films, sont pincés et dans lesquels on fait le vide au moyen d'une pompe à air. La pression extérieure de l'air applique les feuilles amplificatrices contre le film d'une façon uniforme; la cassette reste ainsi flexible dans toutes les directions.

La fixation de ces légères cassettes à l'endroit de la prise de vue se fait au moyen d'aimants permanents constitués par un alliage de fer et d'aluminium.



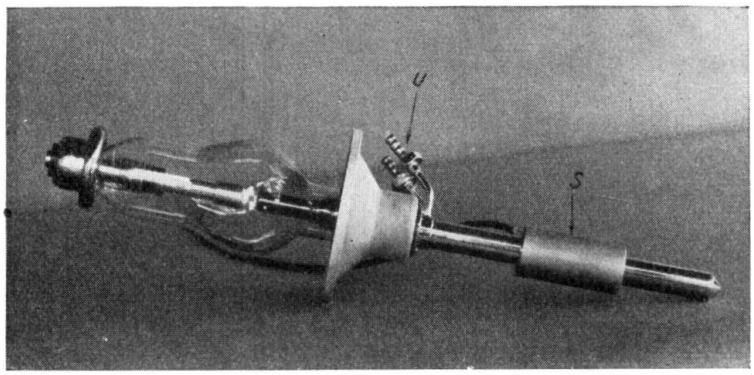


Fig. 4.

Coupe et vue d'une lampe à anode creuse pour l'essai des matériaux.

A) anode en cuivre platinisé.
G) fil incandescent.
K) cathode.
S) bobine collectrice.
U) refroidissement circulaire.

6° *Lecture et interprétation des radiographies.*

L'expérience nous a montré que la lecture des radiographies présente de plus grandes difficultés que leur exécution.

La variété des influences du genre et de la conduite des électrons, des chaufreinages des tôles et de la direction des rayons sur une radiographie ne permet souvent son interprétation que par comparaison de plusieurs prises de vue d'un seul et même ouvrage — éventuellemnt à l'aide de photos de sections préparées. Quelques exemples caractéristiques d'essais pratiques exécutés par la Centrale de radiographie sur des constructions de ponts et charpentes sont représentés aux fig. 5, 6, 7 et 8. On trouvera dans la revue „Der Stahlbau" (7) une classification des fautes caractéristiques que l'on trouve dans les soudures en V, en X et dans les soudures d'angle.

Les plus grandes difficultés se rencontrent, pour l'interprétation des fautes découvertes aux rayons X, au point de vue de leur influence sur la résistance des assemblages soudés. Des investigations furent entreprises à plusieurs endroits au sujet de cette relation (8, 9). La fig. 9 montre quelques exemples caractéristiques des investigations entreprises par la Centrale de radiographie. Ces investigations

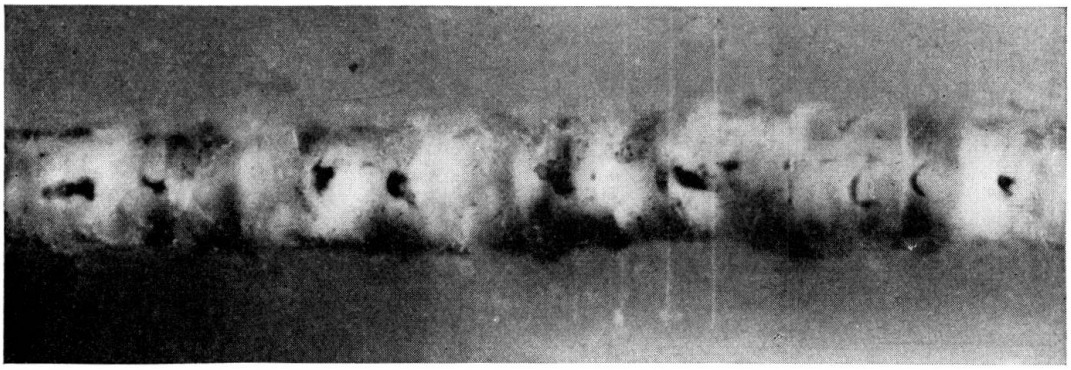


Fig. 5.
Soudure électrique en X (soudage perpendiculaire) avec scories grossières.

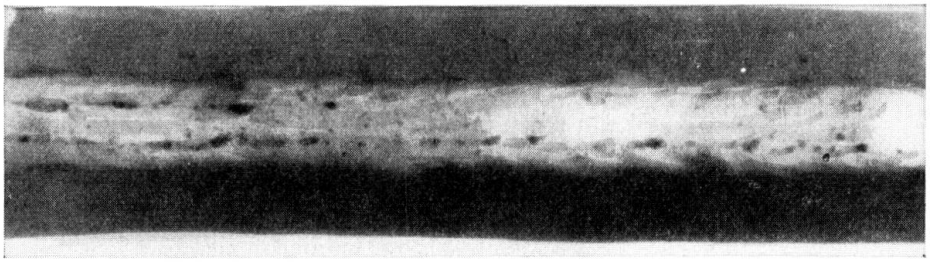


Fig. 6.
Soudure électrique en X (âme) dans une superstructure métallique sans racine pénétrante.

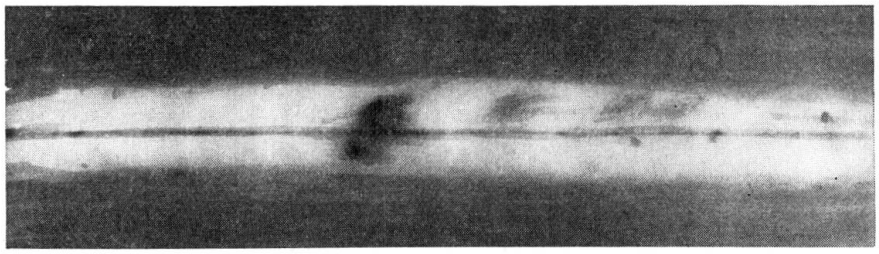


Fig. 7.
Soudure électrique en X (âme) dans une superstructure métallique avec scories.

ainsi que toutes les autres investigations effectuées jusqu'à jour permettent de tirer les conclusions suivantes:

Les fautes de liaison, les fissures, les scories et les fautes grossières à la racine réduisent dans une forte proportion la résistance à la fatigue des assemblages soudés. Par contre des pores petits et moyens, répartis sans règle n'ont pas ou peu d'influence sur la résistance à la fatigue, à condition qu'ils ne soient pas disposés en forme de collier les uns à côtés des autres.

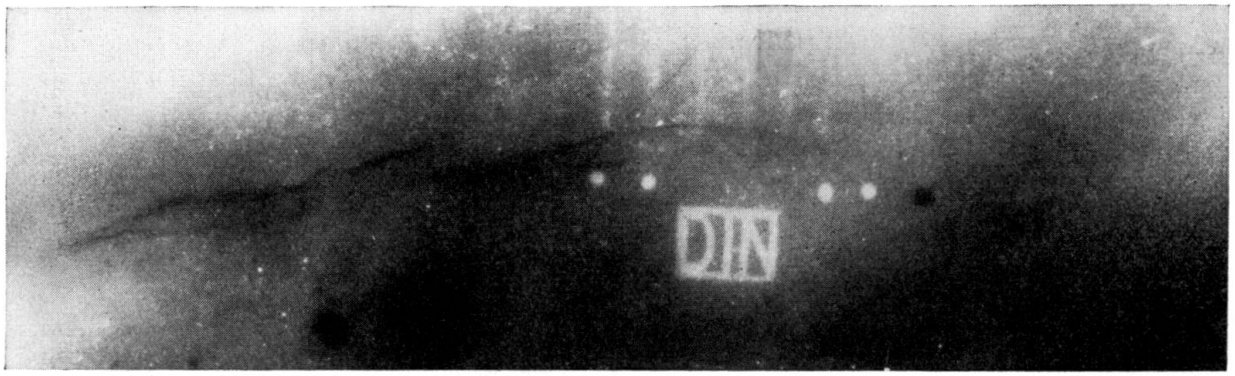


Fig. 8.

Soudure d'angle électrique (joint de semelles) avec fissure résultant des contraintes dues à la chaleur.

7° *Domaine d'application du contrôle radiographique.*

D'après une prescription des Chemins de fer allemands du 27. I. 1936, le contrôle radiographique des soudures est exigé pour toutes les soudures bout à bout de premier rang et depuis moins longtemps pour une partie des soudures de gorge des poutres en I et pour une partie des soudures d'angle des raidisseurs transversaux. Cela est valable aussi bien pour les ponts-route que pour les ponts-rails. Par suite de cette prescription on radiographie actuellement en Allemagne environ 300 m de soudure par jour.

Il n'existe aucune prescription concernant la radiographie des carpentes. Il s'agit le plus souvent dans ce cas de sollicitations purement statiques. Malgré cela on radiographie actuellement déjà les soudures des constructions industrielles importantes (poutres de halles, infrastructures des réservoirs, etc.).

Le jugement des fautes est évidemment beaucoup moins sévère dans les charpentes avec sollicitations statiques que dans les ponts-rails qui sont soumis à des sollicitations oscillantes.

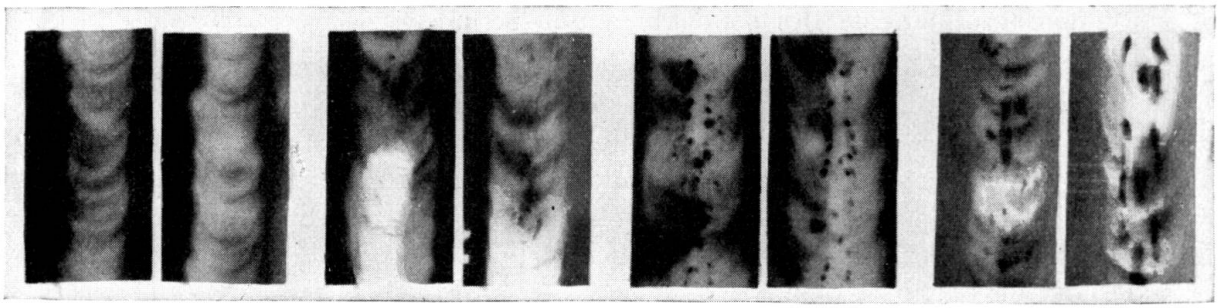


Fig. 9.

Divers assemblages soudés, en radiographies, avec leur résistance à la fatigue.

8° *Organisation du contrôle des soudures en Allemagne.*

Les essais décrits au paragraphe 6 sur la relation qui existe entre les constatations faites aux rayons X et la résistance d'une soudure ne s'étendent pas assez loin pour fournir un critère général pour les cas variables à l'infini qu'il faut juger. Cette variété ne s'étend pas seulement à l'endroit, la position, la

grandeur et la forme de la faute, et aussi au genre du métal de base et des électrodes, mais encore au genre, à la grandeur et à la direction de la sollicitation. Il est pratiquement impossible d'engendrer artificiellement une telle variété pour en tirer une comparaison systématique. C'est pourquoi on ne trouvera probablement pour interpréter les radiographies aucune règle qui permette de porter un jugement absolu sur les fautes.

Ici commence la difficulté mais aussi l'attrait d'un procédé sans détérioration qui ne peut donner que des renseignements indirects sur l'influence des fautes qu'il a permis de déceler. Pour posséder vraiment cette méthode, il faut une intuition basée sur l'expérience, — semblable au diagnostic médical, — qu'aucun manuel et aucune collection de radiographies ne pourra inculquer. Cela doit être antipathique à l'Ingénieur habitué à calculer. Il doit penser avec regrets que ses calculs exacts reposent sur des *hypothèses* sur les propriétés du matériau, les répartitions de contrainte et les grandeurs des contraintes, hypothèses qui elles-mêmes ne sont pas mieux fondées.

Pour généraliser la radiographie sans nuire au développement technique, on a choisi en Allemagne un nouveau chemin: Sur l'impulsion de l'Inspecteur général du réseau routier allemand et de la Direction générale des Chemins de fer allemands, presque toutes les radiographies prises sur des superstructures métalliques sont envoyées après leur examen provisoire, par l'intermédiaire de l'office de reception à la Centrale de radiographie. Cette dernière fait un contrôle du jugement de l'office de réception et lui envoie le résultat de ce contrôle. La Centrale de radiographie prend position aussi bien sur la qualité des radiographies que sur leur interprétation par l'office de réception et même, lorsque cela est nécessaire, sur l'origine des fautes de soudage et les moyens d'y rémédier. On obtient ainsi en premier lieu un jugement unique de toutes les soudures appliquées à des constructions métalliques en Allemagne et l'éducation des organes de réception pour un jugement identique à celui de la Centrale de radiographie. D'autre part on peut ainsi rapidement reconnaître une faute qui s'est produite et que l'on a pu observer à une autre construction quelconque. Enfin, cette surveillance permanente des soudeurs a une influence pédagogique.

Il est naturel que les travaux à l'atelier et sur le chantier ne doivent pas subir de ce fait un retard. C'est pourquoi dans certains cas spéciaux l'office de réception ou les délégués de la Centrale de radiographie peuvent prendre sur place une décision sur l'acceptation ou l'amélioration de certaines soudures. Ce n'est que dans les cas douteux qu'il faut requérir la décision de la Centrale de radiographie qui, de son côté, s'adresse à un staticien du Laboratoire officiel d'essai des matériaux de Berlin-Dahlem.

Afin de pouvoir remplir cette tâche, la Centrale de radiographie est équipée de plusieurs laboratoires radiographiques mobiles, stationnés à différents endroits du Reich. L'expérience de ces laboratoires représente une ample base pour l'interprétation des radiographies. La fig. 10 montre un de ces laboratoires automobiles et son application sur le chantier.

Les succès obtenus avec cette organisation peuvent être estimés par le fait qu'en l'espace de 3 mois les réclamations au sujet des assemblages soudés purent être réduites de plus d'un ordre de grandeur.

C. — *Contrôle magnétique des assemblages soudés.*

Les procédés de contrôle sans détérioration qui reposent sur la perturbation d'un champ magnétique par les endroits défectueux et sur son contrôle au moyen d'une self oscillatrice ou au moyen de poudre magnétique ne sont pas encore suffisamment employés et éprouvés pour pouvoir en parler d'une façon critique. Le procédé de contrôle magnétique (IG-appareil de contrôle des soudures de la AEG) ne peut être employé dans les assemblages avec soudure autogène que jusqu'à une épaisseur maxima de 20 mm. De même le procédé à poudre magnétique s'est introduit pour les soudures autogènes minces, comme elles se présentent plutôt dans la construction des avions que dans les constructions de ponts et charpentes. On verra bientôt si le procédé à poudre magnétique gagnera une certaine importance dans la construction des ponts et charpentes.

Fig. 10.
Contrôle aux rayons X d'une superstructure soudée.

Résumé.

L'ample introduction, au nombre des essais technico-mécaniques, d'essais de résistance à la fatigue des soudures a permis de constater la forte influence des irrégularités et par conséquent des fautes de soudage qui sont presque imperceptibles dans le cas d'une sollicitation purement statique. Pour garantir la qualité des ouvrages soudés, il était absolument nécessaire de découvrir, pour déceler de telles fautes, des méthodes de contrôle qui n'entrainent aucune dété-

rioration. La méthode radiographique s'est révélée jusqu'à présent la plus appropriée car tant au point de vue physique que technique cette méthode est si connue et si developpée qu'elle permet dans presque tous les cas un contrôle sûr, sans entraîner des frais exorbitants. La disposition technique des appareils et des accessoires permet actuellement l'application de la radiographie à l'atelier et sur le chantier; l'exécution du contrôle radiographique est réglée en Allemagne par des directives qui assurent une qualité uniforme des images pour tous les expérimentateurs et qui permettent d'avoir des bases pour porter un jugement objectif sur les radiographies.

Une difficulté que présentent tous les procédés de contrôle sans détérioration est d'estimer l'influence des points défectueux qu'on a constatés, c'est-à-dire de décider si une soudure qui n'est pas parfaite peut être admise ou non. Afin de pouvoir juger dans une mesure plus ou moins exacte, il est nécessaire d'avoir une vaste expérience qui ne peut être acquise que par l'étude centralisée de telles prises de vue. C'est pourquoi en Allemagne le jugement d'une grande partie de toutes les radiographies de soudures se fait à la Centrale de radiographie (Röntgenstelle), Berlin-Dahlem.