

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

Band: 3 (1948)

Artikel: Constatations relatives au retrait des soudures

Autor: Campus, F. / Louis, H. / Dehan, E.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-4076>

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: 14.01.2026

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

Ia5

Constatations relatives au retrait des soudures

Untersuchungen über die Schrumpfung der Schweissungen

Observations concerning welding contraction

F. CAMPUS

Professeur à l'Université
de
Liège

H. LOUIS

Ingénieur en chef-Directeur
des Ponts et Chaussées
Liège

E. DEHAN

Ingénieur
des Ponts et Chaussées
Liège

Une enquête menée en 1936 à propos des premiers incidents survenus, dans les ateliers belges, à des ponts soudés en cours d'exécution, fit apparaître d'une manière indiscutable que la plupart des fissurations ou des ruptures trouvaient leur origine dans les manifestations du retrait des soudures.

L'étude détaillée de ces incidents a permis de jeter les bases d'une vaste recherche sur le retrait, les déformations et les tensions des soudures. Cette recherche fut confiée à l'Institut du Génie civil de l'Université de Liège par l'Administration des Ponts et Chaussées et par un Consortium de constructeurs de ponts. Commencée en 1937 elle fut poursuivie pendant la guerre en dépit de difficultés de tous genres et continuée après les hostilités ; son aboutissement est actuellement en vue.

Les principaux résultats des recherches ont été consignés dans un ouvrage récent⁽¹⁾ ; nous en reprendrons l'essentiel dans la présente communication.

Retrait transversal

Le retrait transversal des soudures est un élément important à considérer : quelle que soit l'imperfection de nos connaissances à son sujet, il reste un des facteurs dont l'intervention permanente conditionne la qualité de l'exécution et le comportement des constructions soudées.

La majeure partie des recherches a porté sur des éprouvettes dont les éléments sont libres de se déformer et de se déplacer pendant le soudage :

Le retrait transversal ne dépend pas de la longueur des pièces à assembler, il se localise dans des régions très voisines de la soudure de telle

⁽¹⁾ F. CAMPUS, *Recherches, Etudes et Considérations sur les Constructions soudées*, Editions Sciences et Lettres, Liège, 1946.

sorte que sa valeur est pratiquement indépendante de la base de mesure. Pour une épaisseur donnée, le retrait transversal est proportionnel à la section réelle de la soudure. Le retrait a été rapporté à la section théorique du joint, telle qu'elle résulte du plan ou, ce qui revient au même, à la largeur moyenne du chanfrein (L_m^c). Pour des joints de 15 mm d'épaisseur et de 100 mm de longueur, à chanfrein en V et en X, on a trouvé pour deux séries d'essais dont les éprouvettes étaient exécutées par des soudeurs différents :

$$\rho_m = 0,19 L_m^c \pm 12 \% \text{ d'écart probable}$$

$$\rho_m = 0,158 L_m^c \pm 9,2 \% \text{ d'écart probable}$$

ρ_m est la moyenne du retrait transversal mesuré sur chaque face de celle-ci, à mi-longueur du joint soudé. La différence notable entre les résultats des deux séries provient de la différence de soudeur. Les éprouvettes de la première série comportaient sur chacune des faces des bourrelets de soudure plus importants que pour les éprouvettes de la deuxième série. Cette

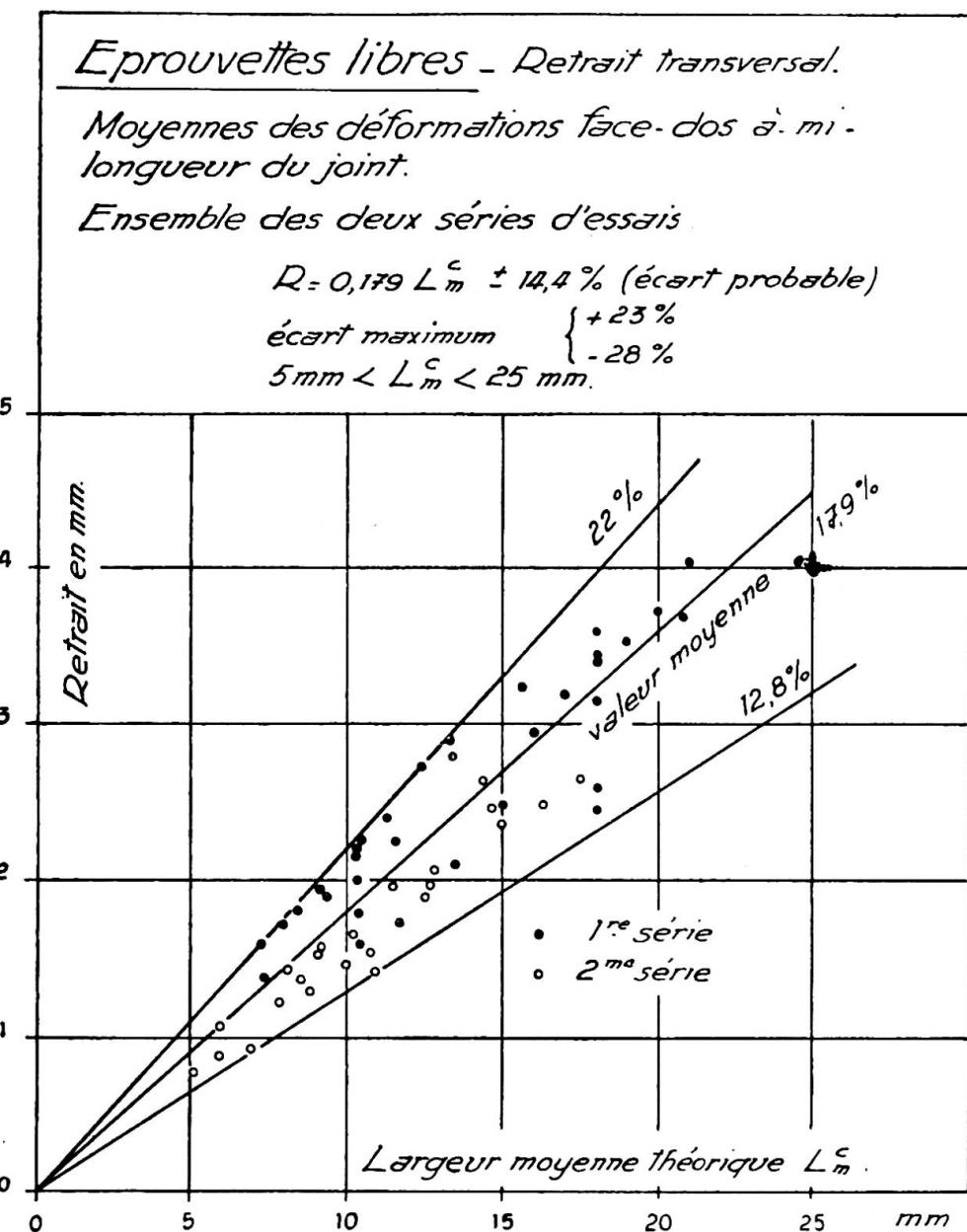


Fig. 1.

différence dans la valeur du retrait résulte donc de la différence dans la section totale du joint soudé à laquelle le retrait est proportionnel. En réunissant les résultats de tous les essais des deux séries, on trouve

$$\rho_m = 0,179 L_m^c \pm 14,4 \% \text{ d'écart probable (fig. 1).}$$

Cette loi linéaire est en réalité trop simpliste même à épaisseur constante du joint ; d'autres éléments influent en effet sur le retrait à section constante de chanfrein, notamment le nombre de passes et par conséquent le diamètre des électrodes, la durée de l'exécution du joint, l'intensité du courant. Le facteur affectant la largeur moyenne du chanfrein augmente aussi sensiblement avec la longueur du joint. Cette loi s'applique d'ailleurs à un domaine limité d'épaisseurs et elle est inexacte pour les chanfreins en X. On constate en effet que la loi $\rho_m = 0,18 L_m^c$ établie d'après les résultats des essais sur des plats de 15 mm est seulement valable pour les chanfreins en V de 5 à 30 mm d'épaisseur et pour les chanfreins en X seulement dans un étroit domaine d'épaisseurs : 15 à 20 mm (fig. 2).

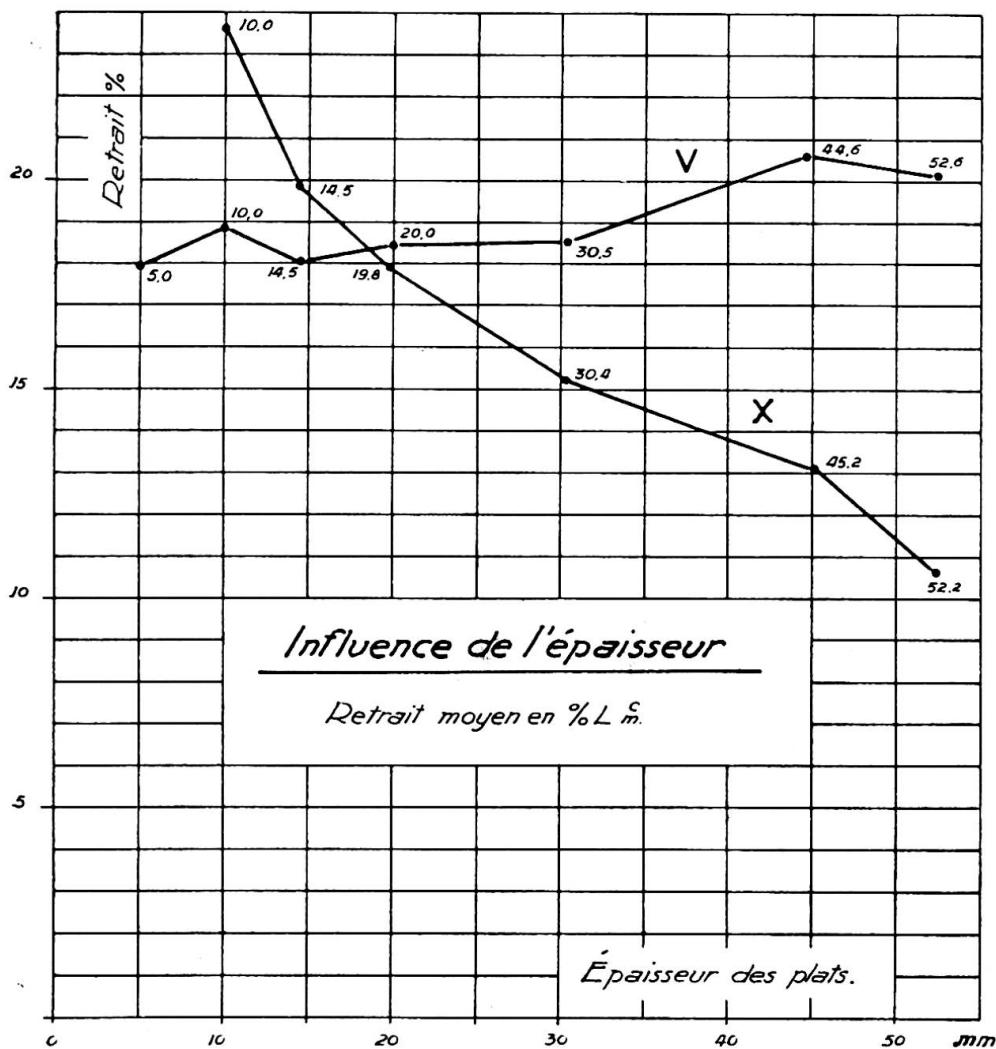


Fig. 2.

Lorsqu'on mesure le retrait transversal sur des éprouvettes de mêmes dimensions que les précédentes, mais encastrées aux deux extrémités dans un cadre rigide (fig. 3) le retrait transversal est diminué aussi bien à l'état d'encastrement qu'après la libération des éprouvettes (libération qui aug-

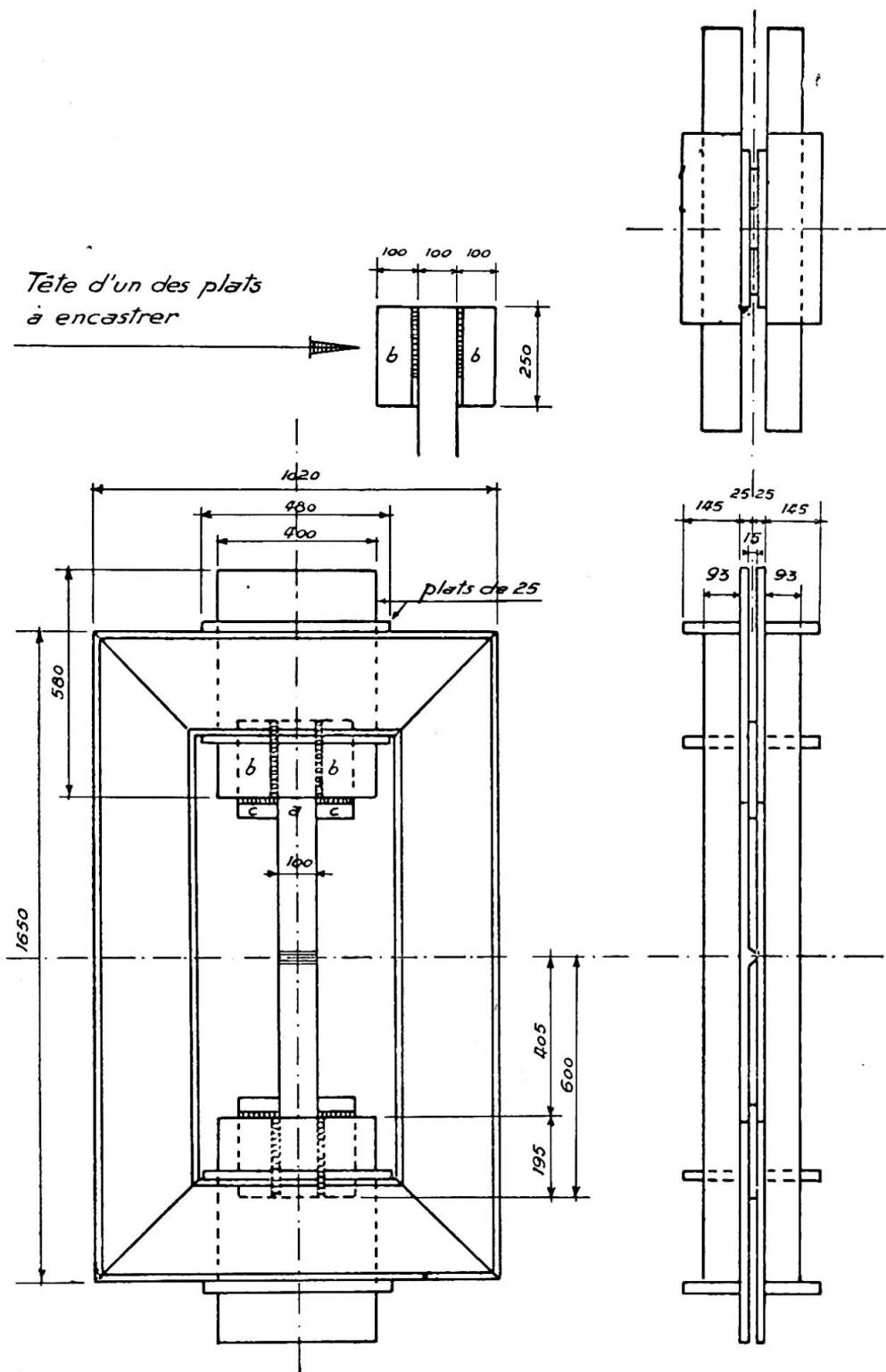


Fig. 3. Cadre rigide pour l'encastrement des éprouvettes.

mente légèrement le retrait). Au stade actuel des essais, on a envisagé pour les éprouvettes encastrées libérées la relation provisoire

$$\rho_m = 0,5 + 0,075 L_m^c.$$

Il convient de signaler que le retrait est mesuré sur une base de 48 mm, car dans le cas des éprouvettes encastrées le retrait n'est plus indépendant

de la base de mesure; il va en décroissant depuis le joint soudé jusqu'aux extrémités encastrées, en raison de l'allongement élastique ou permanent des éprouvettes. La comparaison de cette loi obtenue pour les éprouvettes encastrées et de la loi signalée à propos des éprouvettes libres montre, dans le cas de l'encastrement, une diminution du retrait d'autant plus importante que le chanfrein est grand (fig. 4). Nous insistons d'ailleurs sur le caractère provisoire de cette loi du retrait des éprouvettes encastrées, dont la forme doit être vérifiée par de nouveaux essais car son caractère est peu rationnel en raison de la présence du terme constant.

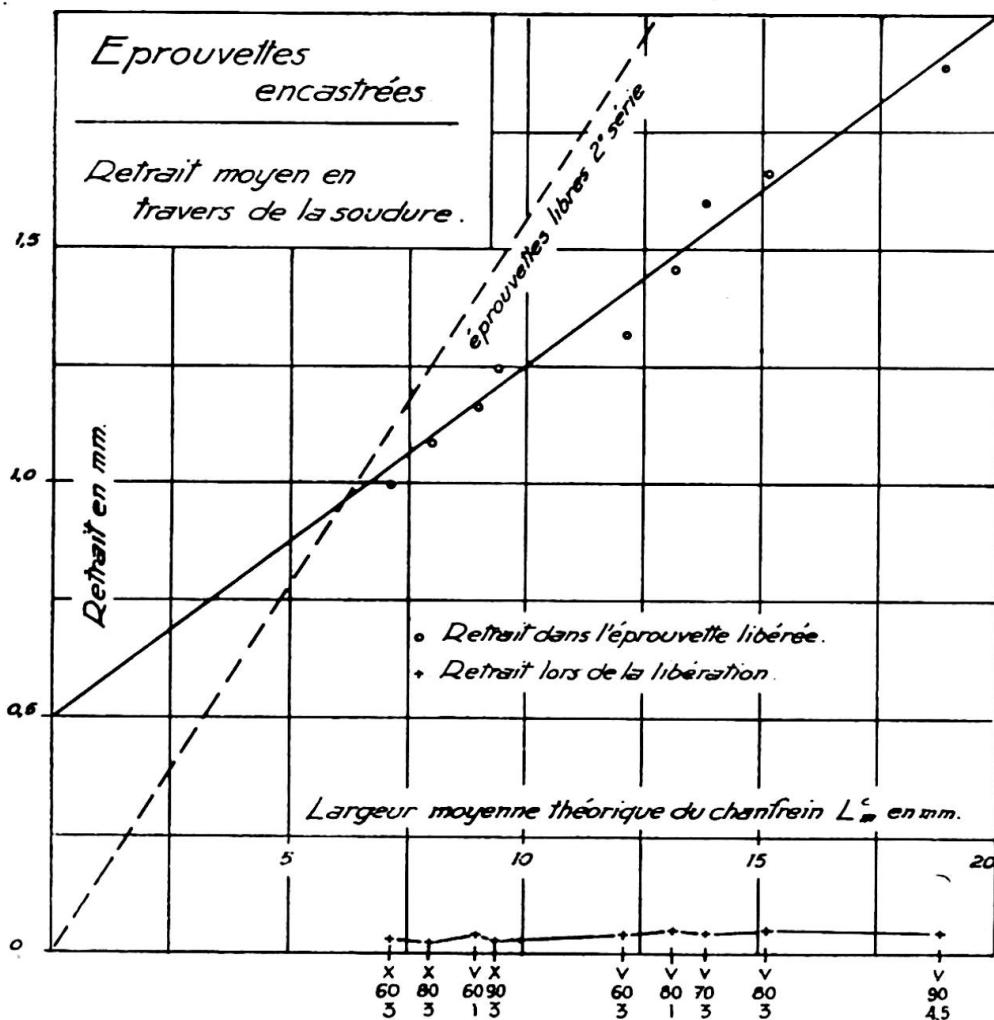


Fig. 4.

Le retrait transversal du joint a aussi été mesuré pour des éprouvettes libres de mêmes dimensions que celles envisagées jusqu'ici mais dont les éléments sont assemblés par double couvre-joint avec cordons d'angle frontaux et latéraux. Cette étude est seulement entamée, mais il est déjà possible de signaler que les retraits sont sensiblement plus faibles que pour une soudure en bout. La valeur moyenne du retrait transversal d'un joint soudé en bout, dont l'angle d'ouverture est de 80 degrés, l'épaisseur de 15 mm et l'écartement initial des plats de 3 mm, est de 2,45 mm tandis que le retrait transversal (mesuré sur une base de 240 mm) d'un assemblage de pièces de 15 mm d'épaisseur à double couvre-joint fixé par cordons frontaux est au maximum de 0,853 mm et que le retrait transversal (mesuré sur une base de 240 mm) d'un assemblage à double couvre-joint fixé par cordons latéraux est au maximum de 0,564 mm.

Déformations au voisinage des soudures

Le retrait de la soudure provoque, au voisinage du joint, des déformations non discernables à l'œil nu et qui ont le caractère des déformations

ÉPROUVEtte LIBRE CHANFREIN en V-ANGLE 70° x 3 mm (poids de 15000)

DÉFORMATION dans les PLATS - Dos.

SOUDURE.

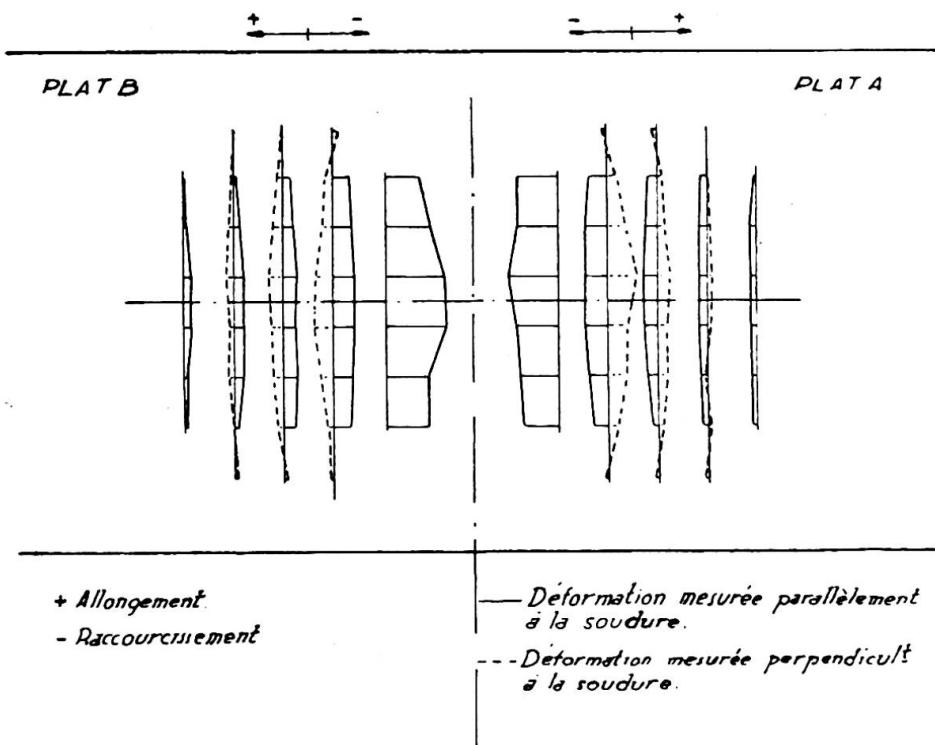


DIAGRAMME des DÉFORMATIONS MAXIMA (suivant l'axe des plats)

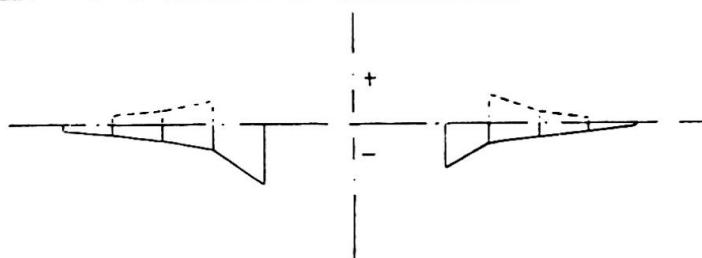


Fig. 5.

permanentes et élastiques que subissent les éléments de construction sous l'effet des forces extérieures. Ces déformations sont triaxiales mais elles peuvent seulement se mesurer sur les faces et sur les tranches des éprouvettes. Sur les faces on mesure les déformations longitudinales (parallèlement à la direction du joint) et les déformations transversales (perpendiculairement à la direction du joint).

Pour les éprouvettes libres soudées bout à bout, ces déformations obéissent à une certaine allure de variation (fig. 5). La déformation longitudinale est une contraction maximum au milieu du joint et minimum

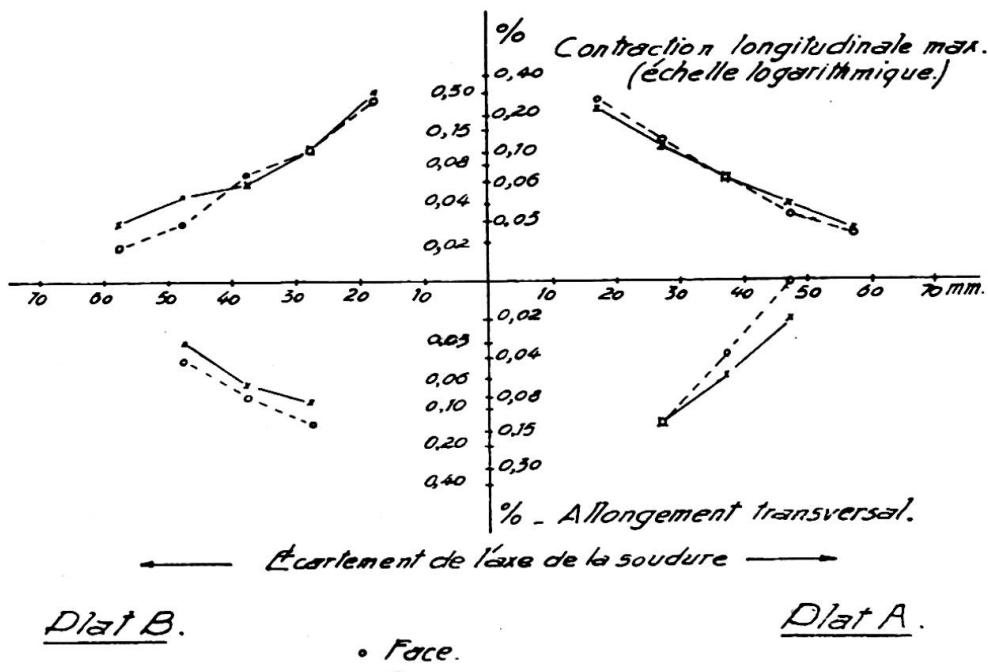
ÉPROUVEUSE LIBRE.Chantrein en V.. Angle 70°. $\alpha = 3$ mm. (plat de 15 mm.)Déformation dans les plats à mi-longueur du chantrein.

Fig. 6.

aux bords. Les valeurs diminuent avec la distance du joint soudé; la décroissance suivant l'axe médian des éprouvettes est d'allure logarithmique (fig. 6). Les contractions longitudinales maxima au voisinage des soudures atteignent 0,2 % (joint en X), voire 0,5 % (joint en V). Ces contractions varient peu le long du joint; elles produisent un retrait longitudinal global sur toute la longueur du joint. On trouve généralement très peu de renseignements sur la valeur du retrait longitudinal; les mesures faites au cours de nos essais sur des éprouvettes dont la longueur s'étale entre 60 et 300 mm sont consignées sur la figure 7. La variation du retrait longitudinal avec la longueur du joint est tout à fait irrégulière; le retrait longitudinal est beaucoup moins important pour les joints en X que pour les joints en V, il paraît dépendre surtout de la conduite de l'opération de soudure.

La déformation transversale est un allongement dans la partie axiale des plats, elle s'annule de part et d'autre de cet axe pour se transformer en contraction sur les bords pour les éprouvettes dont l'épaisseur atteint 20 mm (fig. 5); pour les épaisseurs supérieures à 30 mm elle reste un allongement sur les bords. L'allongement transversal est presque toujours supérieur à la contraction longitudinale; il peut atteindre 2 % pour les éprouvettes très épaisses. Les déformations longitudinales et transversales varient évidemment avec l'épaisseur et avec la forme du joint (fig. 8 et 9). Ces déformations longitudinales et transversales se produisent à chaud; elles sont de beaucoup supérieures aux déformations élastiques à la température ordinaire. Il n'y a donc pas de rapport régulier entre elles, sauf à une distance suffisante du joint soudé où les deux déformations sont toujours de sens inverse et où le rapport

$$\frac{\text{déformation transversale}}{\text{déformation longitudinale}}$$

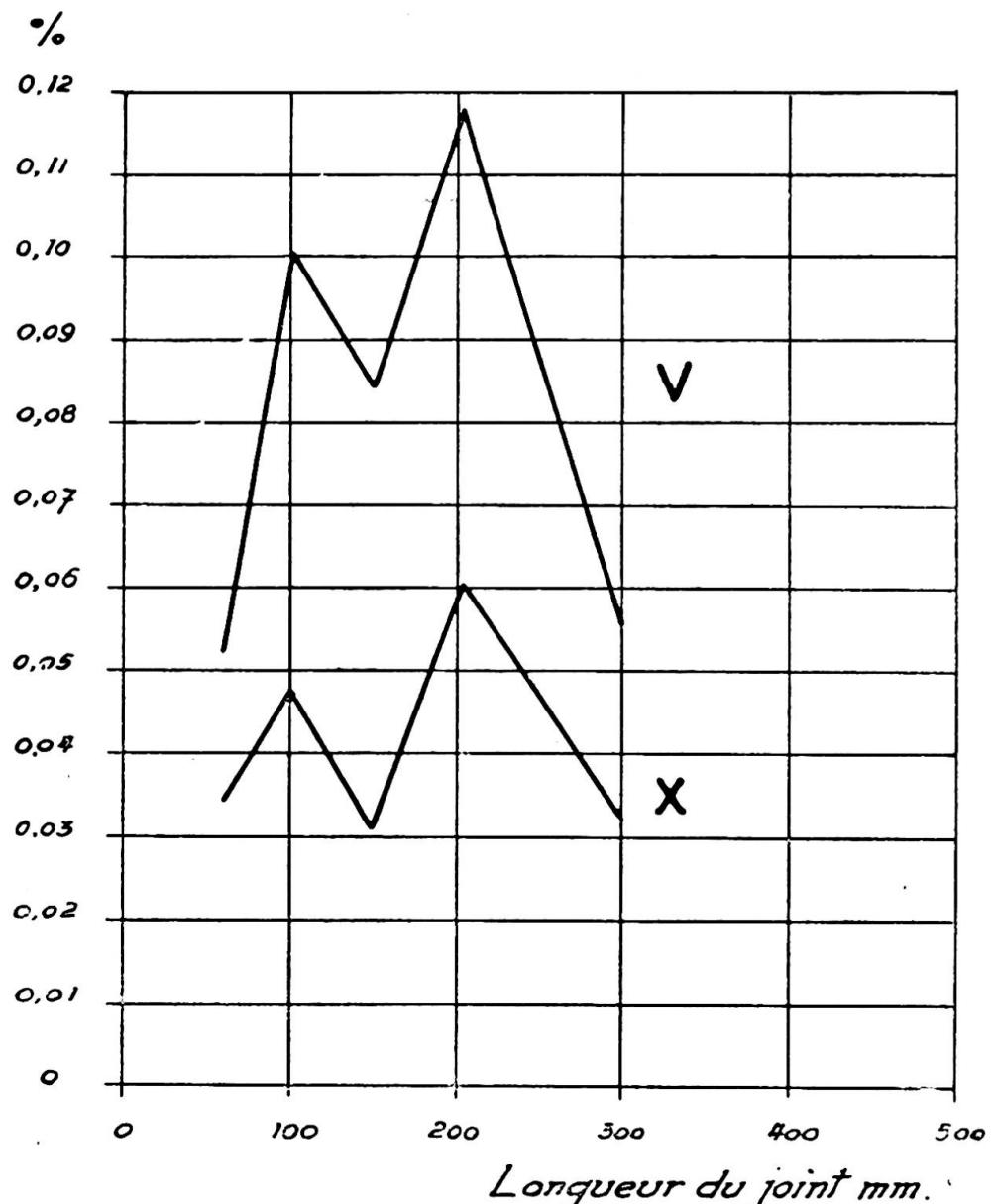
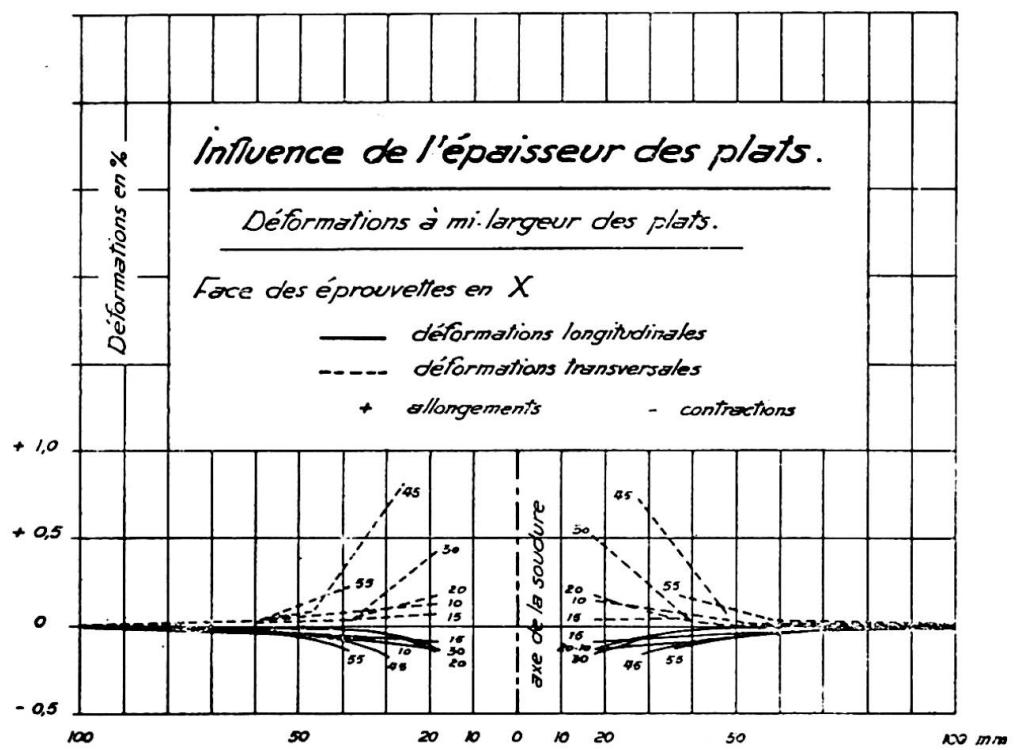
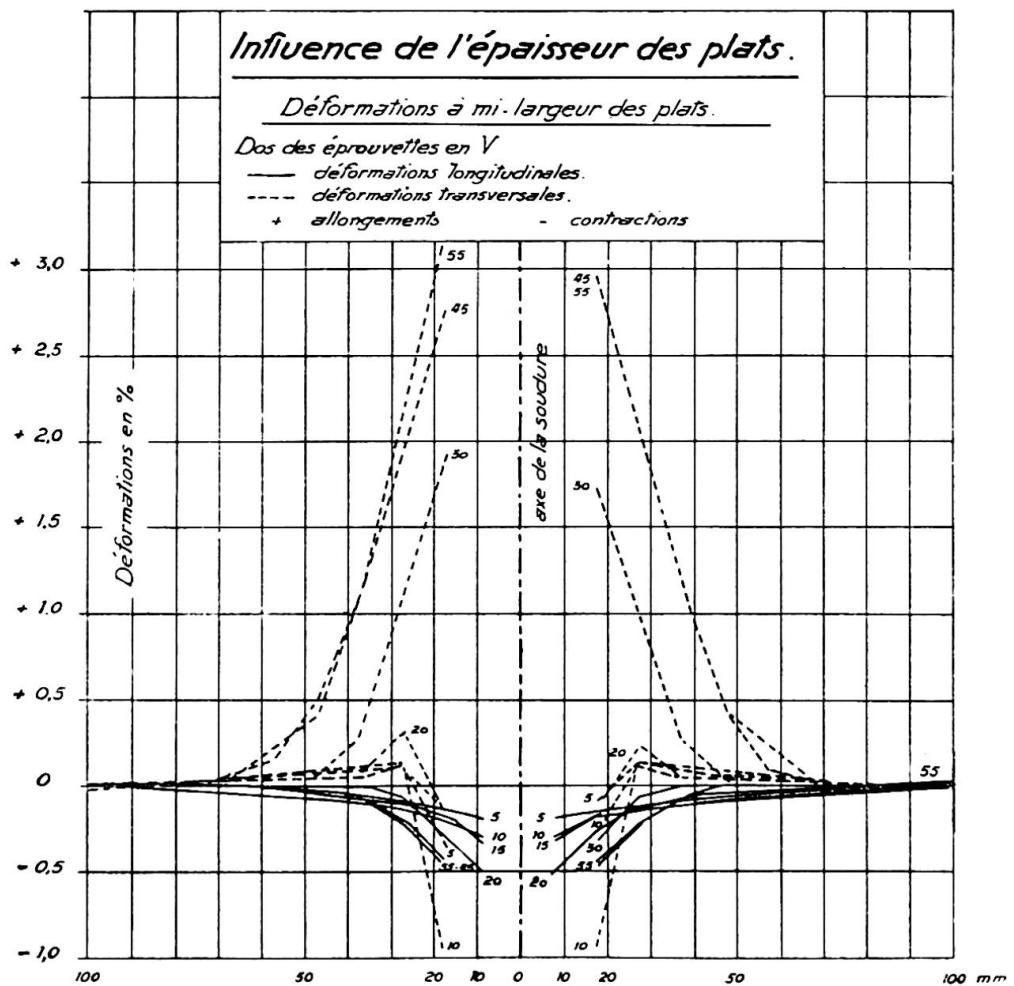


Fig. 7. Déformation longitudinale à 24 mm de l'axe du joint en % de la base de mesure, multiple de 47 mm.

tend vers la valeur du coefficient de Poisson. Mais en ces endroits la valeur des déformations est de l'ordre de grandeur de la précision des mesures, leur rapport est donc incertain. Il n'y a pas de relation directe entre les déformations et le retrait transversal ; par contre, le retrait angulaire qui a peu d'influence sur le retrait transversal augmente considérablement la grandeur des déformations transversales des soudures en V et modifie leur répartition.

Dans le cas des éprouvettes encastrées aux deux extrémités, des déformations générales d'encastrement se superposent aux déformations voisines de la soudure (fig. 10). La libération des encastrements entraîne la disparition des déformations élastiques d'encastrement, tandis que les déformations résiduelles subsistent (celles-ci comprenant encore des déformations élastiques au voisinage de la soudure) (fig. 11). Par rapport aux éprouvettes libres correspondantes, les déformations des éprouvettes encastrées et



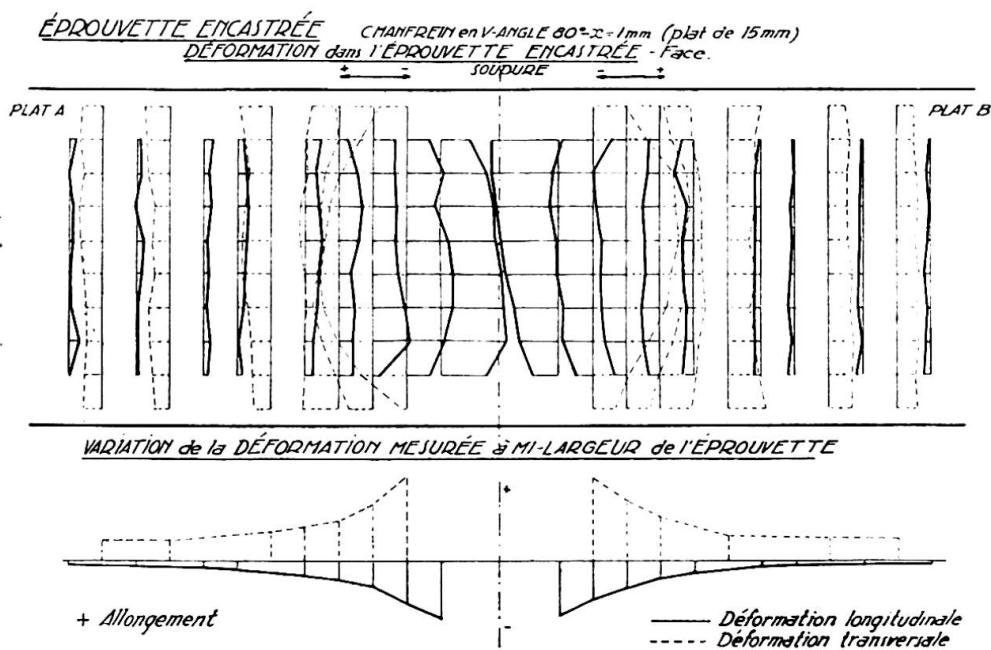


Fig. 10.

libérées sont nettement supérieures et peuvent être égales au double, même au triple de celles des éprouvettes libres pour les soudures épaisses en V ou en X.

Les déformations des assemblages par double couvre-joint et cordon d'angle ont seulement été mesurées sur un nombre réduit d'éprouvettes libres ; elles sont très concentrées au droit des cordons et présentent dans l'axe de ceux-ci une pointe accentuée (fig. 12). L'ordre de grandeur de la déformation maximum est le même que pour les soudures bout à bout.

Tensions de soudure

Les déformations longitudinales et transversales dont il vient d'être question, comprennent à la fois des déformations plastiques à chaud, des

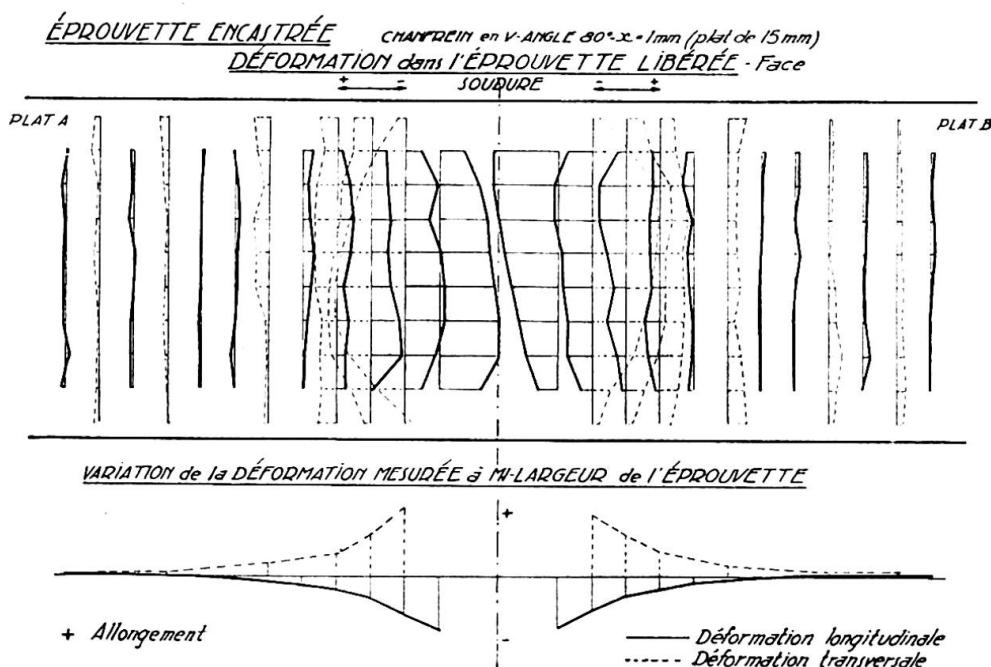


Fig. 11.

ASSEMBLAGES PAR DOUBLE COUVE-JOINT AVEC CORDONS TRONCAUX

PLATS DE 100x1500. COUVE-JOINT DE 100x9. CORDONS PARALLÈLES DE 9mm.
DÉFORMATIONS SUR LA TRANCHE A MI-LARGEUR DANS LE SENS DE LA LONGUEUR DES PLATS.

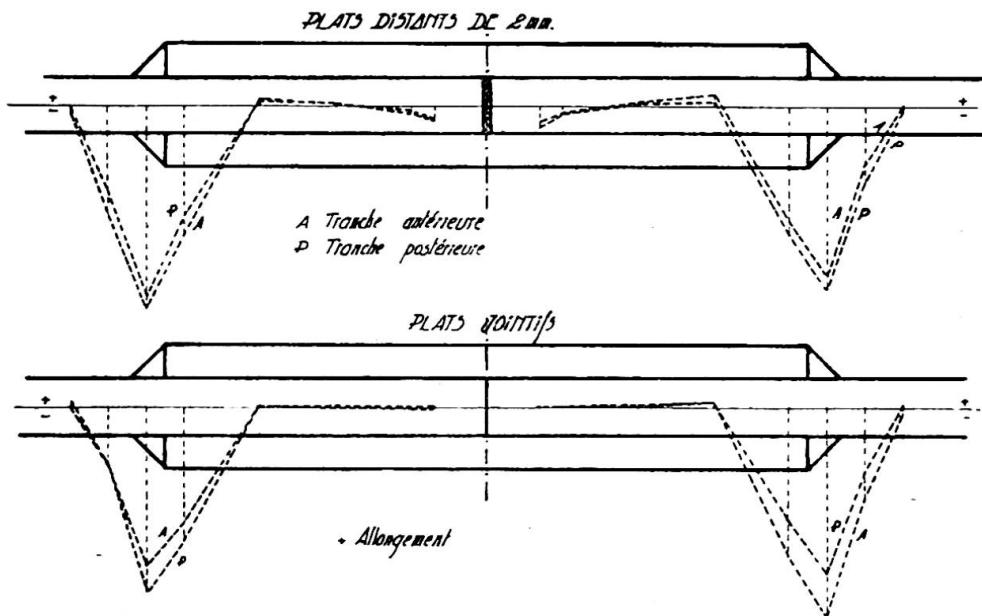


Fig. 12.

déformations permanentes lors du refroidissement et des déformations élastiques. Leur mesure ne permet donc pas la détermination des tensions ; celles-ci ne s'obtiennent qu'en procédant à un débitage ou à une trépana-

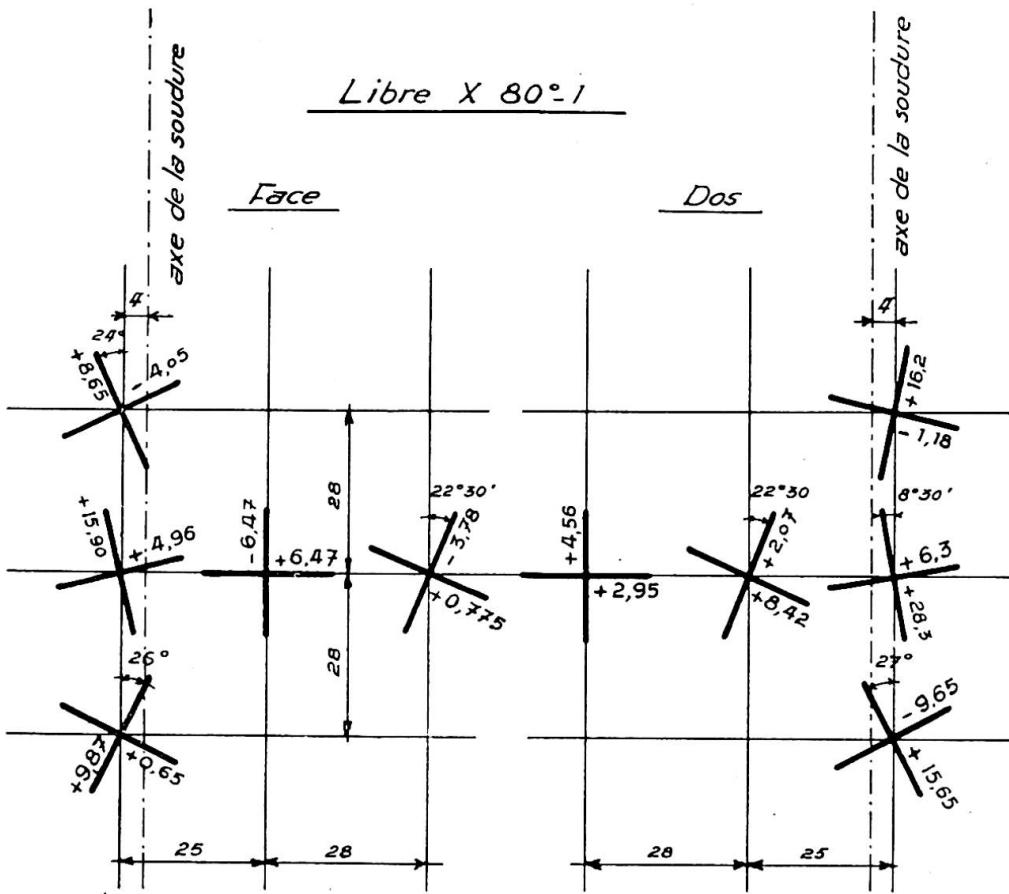


Fig. 13.

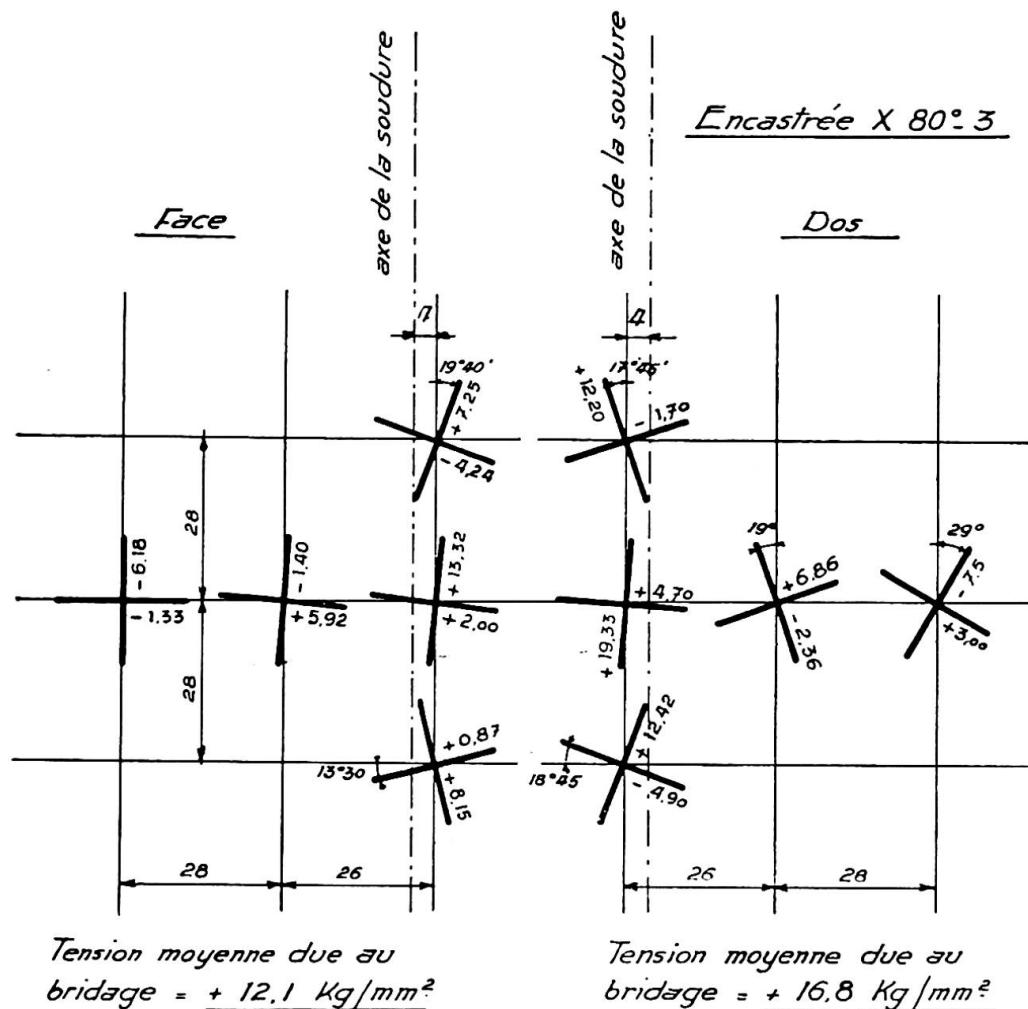


Fig. 14.

tion des éprouvettes ; cependant, dans les régions suffisamment éloignées du joint où les déformations sont inférieures à celles correspondant à la limite élastique, la mesure de ces déformations suivant trois directions au moins, peut conduire à la détermination des tensions.

Nous distinguerons *les tensions directes* de soudure, c'est-à-dire celles qui sont engendrées du seul fait de la soudure des éprouvettes libres et *les tensions indirectes* de soudure qui résultent de l'empêchement de retrait des éléments à assembler par soudure :

Les tensions directes sont étroitement localisées au voisinage des soudures et leur valeur décroît rapidement lorsque la distance du joint augmente ; l'allure de leur répartition est connue pour un régime thermique théoriquement défini, seules les tensions directes existent dans les éprouvettes libres. Les mesures de tensions qui ont été faites par débitage d'éprouvettes libres montrent que les tensions longitudinales et transversales au voisinage des soudures en bout sont assez irrégulières. Les plus fortes tensions sont longitudinales et atteignent la limite d'élasticité dans la soudure et à son voisinage immédiat. Transversalement, il existe des tractions dans la partie centrale et des compressions sur les bords. Leurs valeurs maxima sont inférieures à celles des tensions longitudinales (fig. 13).

Les tensions indirectes de soudure sont les plus dangereuses ; elles ne réalisent pas un diagramme d'équilibre ; elles se composent au voisinage

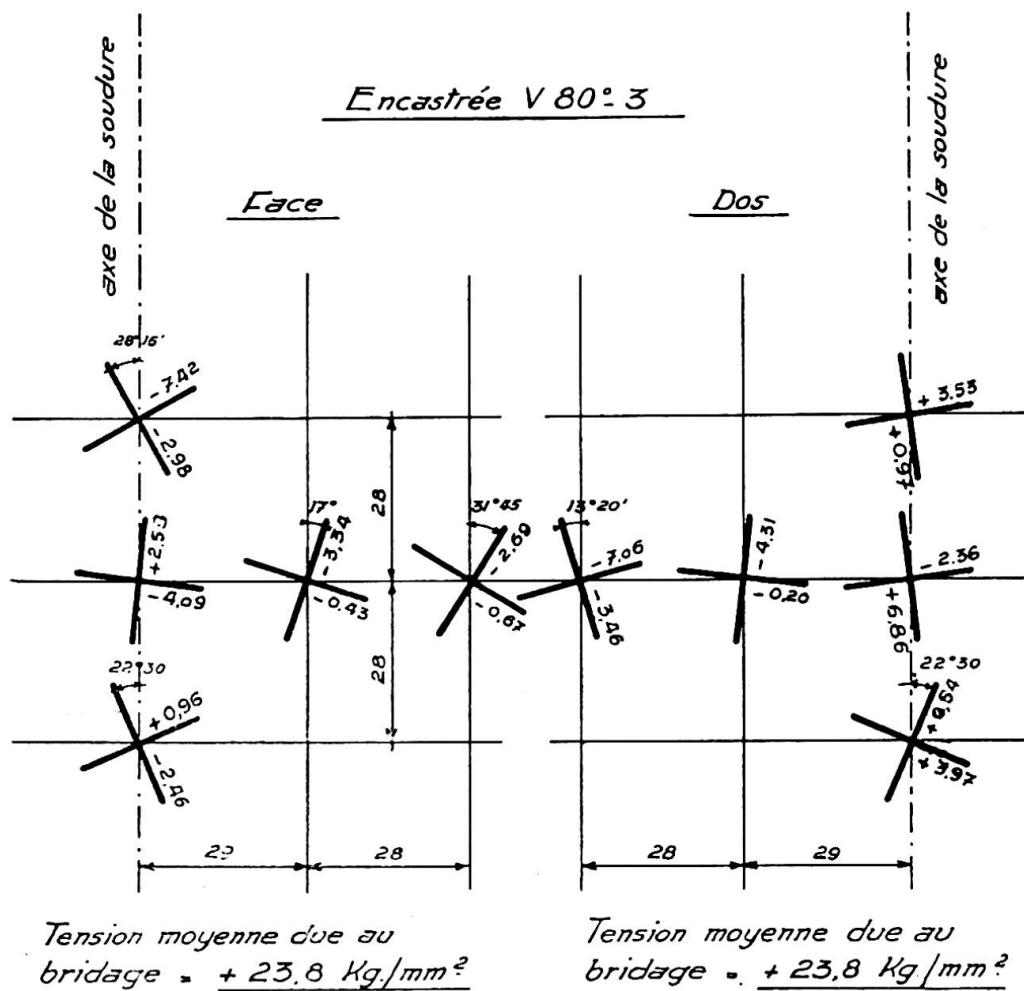


Fig. 15.

des soudures avec les tensions directes, suivant les lois de la plasticité ou de l'élasticité, suivant que la limite élastique est atteinte ou non. Ces tensions indirectes sont des tractions transversales dans toute l'étendue de l'éprouvette et de l'assemblage ; elles se mesurent facilement par libération des éléments. En cas d'encastrement de pièces courtes, même d'épaisseur faible, elles atteignent presque toujours la limite élastique.

Les tensions résiduelles directes de soudure, après libération de l'éprouvette encastrée, sont du même ordre de grandeur (ou légèrement inférieures) que les tensions directes de l'éprouvette libre lorsque la tension indirecte de soudure (ou d'encastrement) est inférieure à la limite élastique (fig. 14). Si la tension indirecte atteint la limite élastique, ces tensions résiduelles directes sont considérablement réduites, surtout dans le sens longitudinal, *après libération de la tension indirecte* (fig. 15).

Les recherches entreprises à ce jour en vue de la détermination du retrait des soudures et de ses effets revêtent déjà une ampleur considérable. De nombreux résultats demanderaient cependant à être précisés, tandis que l'influence de certains facteurs semblait avoir été insuffisamment déterminée. La recherche est activement poursuivie. Elle comporte notamment :

1° La détermination de l'influence de l'épaisseur (5 à 75 mm) et de la longueur du joint (60 à 2 000 mm) sur le retrait et ses effets;

2° L'étude de l'effet de la reprise au dos des soudures en V sur le retrait transversal et les déformations ;

3° La mesure du retrait des soudures exécutées à des températures s'échelonnant entre 0 et 20° ;

4° L'étude du retrait des éprouvettes ayant subi un préchauffage et un recuit à une température de 650° ;

5° La détermination systématique des tensions de soudure dans des assemblages d'épaisseur et de longueur variables ;

6° La généralisation de l'étude des éprouvettes encastrées par un choix d'épaisseurs allant jusqu'à 30 millimètres.

Une part très importante de la recherche en cours est consacrée à l'étude systématique des soudures d'angle (dites aussi soudures au collet), des soudures frontales et des soudures latérales. Une comparaison très complète sera établie avec les soudures bout à bout ; elle implique la réalisation d'un grand nombre d'assemblages bout à bout avec double couvre-joint ; ces couvre-joints étant soudés soit sur des pièces libres, soit sur des pièces encastrées. Une attention très importante sera aussi consacrée à l'influence du programme d'exécution des soudures sur l'importance du retrait et de ses manifestations. Nous envisageons également de procéder prochainement à des mesures sur des assemblages dont les soudures seront exécutées en une ou deux passes suivant un procédé automatique ; cette exécution devant conduire avec certitude à une diminution importante des effets du retrait.

Conjointement avec l'exécution des travaux sur le retrait entrepris à l'Université de Liège, nous avons tenté, dans des circonstances de guerre difficiles, de faire déborder l'étude du retrait du cadre du laboratoire, en appliquant les principes et les modalités de cette étude à un pont soudé levant, de faible portée, sur lequel nous avons procédé à des mesures de retrait et de déformation au cours de son exécution à l'atelier :

Le tablier de ce pont levant, établi sur le canal de la Pêcherie à Gand, a une portée entre appuis de 22 mètres. Les deux maîtresses-poutres sont des poutres à âme pleine. La hauteur dans la partie médiane est de 1^m356 sur une longueur de 12^m648 ; de part et d'autre de cette partie médiane, la hauteur des poutres est de 1^m525. Chaque longeron est constitué d'une âme pleine en tôle de 14 mm et de deux semelles constituées par des plats nervurés de 450×25 mm. Un plat de 400×28 renforce les semelles dans la partie centrale. Les tôles et plats nécessaires n'étant pas fournis en pièces de longueur suffisante, des soudures transversales étaient nécessaires. L'occasion se présentait ainsi de mesurer l'effet du retrait des soudures sur de grands éléments qui interviennent normalement dans la composition des poutres soudées importantes. Le programme des soudures prévoyait la mesure du retrait du joint et des déformations, au voisinage d'un joint réunissant deux tôles d'âme de 1 196×14 mm et d'un joint réunissant deux plats de semelle de 450×25 mm. Le programme des mesures avait encore pour objet la détermination des réactions qui s'établissent entre âme et semelles lorsqu'on assemble bout à bout deux tronçons de poutre, cas qui peut se présenter lors du montage sur chantier. Cette question avait déjà fait l'objet d'une étude publiée en 1940 par le Dr Bierett, dans son mémoire *Untersuchungen zur Ermittlung günstiger Herstellungsbedingungen für die Baustellenstöße geschweißter Brückenträger*. Uniquement en raison de l'étude entreprise sur le retrait, il fut décidé de réaliser une des deux maîtresses-poutres en trois tronçons. L'assemblage des trois tronçons a été fait en atelier, mais dans les conditions du chantier, la poutre étant maintenue verticale pendant toute la durée des opérations de soudure. Les

mesures ont été faites dans les conditions matérielles les plus défavorables. Malgré les précautions prises et les dispositifs de protection utilisés, de nombreux repères tracés sur les pièces ont été abîmés. Les renseignements obtenus ont donc forcément été incomplets.

A. Retrait provoqué par les soudures en bout de plats et de tôles

La figure 16 donne quelques résultats caractéristiques et des indications sur le procédé opératoire adopté pour la soudure : pour la tôle d'âme de 14 mm, le retrait dans le joint est de 1,48 mm, ce qui correspond à un retrait de 18,5 % de la largeur moyenne du chanfrein ($L_m = 8 \text{ mm}$). Cette valeur est à comparer à celle obtenue en laboratoire sur éprouvettes. L'image des déformations transversales et longitudinales des tôles aux environs de la soudure est révélatrice du processus de soudure utilisé, les débuts de cordons étant situés vers le milieu du joint. Le retrait de la soudure dans le joint de deux plats de $450 \times 25 \text{ mm}$ n'a pu être mesuré, les repères ayant été détruits lors du travail de soudure. Quelques diagrammes des déformations relevées dans ces plats montrent une allure beaucoup moins régulière que celle des diagrammes obtenus avec les éprouvettes. Cependant les valeurs maxima des déformations ne dépassent pas celles relevées sur des éprouvettes de même épaisseur.

B. Joint de montage

Les joints de semelle ont été décalés et reportés de part et d'autre du joint d'âme. Le joint de collet a été maintenu ouvert sur une longueur de 1 mètre. La soudure a été réalisée par quatre soudeurs répartis à raison d'un pour chaque joint de semelle et d'un soudeur pour chaque face du joint d'âme. Les joints de semelle ont d'abord été soudés sur un tiers de l'épaisseur ; c'est à ce moment seulement que fut réalisée la première passe du joint d'âme. Les quatre soudeurs opérèrent ensuite simultanément sur les joints de semelles et sur les deux faces du joint d'âme. La soudure d'âme n'a pas été réalisée d'une manière symétrique par rapport au point situé à mi-longueur du joint. La majorité des cordons ont été déposés en progressant du bas vers le haut, le départ du premier cordon se situant au pied du joint pour un soudeur, à mi-hauteur du joint pour l'autre. C'est à cette dissymétrie de la soudure de l'âme qu'il faut attribuer le fait que les déformations longitudinales moyennes dans les semelles sont plus prononcées dans la semelle inférieure et correspondent à un raccourcissement de la base de mesure, disposition d'ailleurs favorable pour le service de l'ouvrage.

Les diagrammes de déformations représentés à la figure 16 révèlent d'autre part des flexions importantes des semelles ; l'image de la déformation de ces pièces, par suite des flexions subies, doit être extrêmement complexe. Afin de réduire l'importance de ces flexions de semelles sous l'effet des retraits angulaires, provoqués par les joints en V, un des joints de montage avait été pourvu, avant soudure, d'un système d'étançons et de tirants prenant appui sur les semelles. Les diagrammes des déformations longitudinales relevées ne marquent pas d'influence de ce dispositif. Grâce à des mesures de déformation effectuées suivant quatre directions en de nombreux points éloignés des joints soudés, il a été possible de déterminer

les tensions principales en ces points. La représentation des tensions principales relevées dans le joint de montage II (fig. 16bis) montre la valeur parfois importante de ces tensions ; on remarque également que les directions principales ne sont pas toujours orientées dans le sens de la poutre et, là où les deux tensions principales sont indiquées, on constate qu'il ne s'agit pas de traction simple. La flexion de la semelle inférieure est nettement marquée ; sa tension moyenne varie depuis le bord de la semelle jusqu'au milieu où elle atteint une valeur de l'ordre de 16 à 20 kg/mm² en compression. La fermeture des joints de collet, opération dont les résultats ne sont pas renseignés ici, modifie profondément le jeu des tensions dans l'âme, moins dans la semelle. L'ordre de grandeur des tensions principales est peu modifié.

Quelques lois simples, déduites par approximation des résultats complexes des observations et des mesures sur des soudures en bout dont les éléments sont libres de se déplacer pendant le soudage, peuvent déjà être appliquées avec succès, en vue de la réduction des effets du retrait :

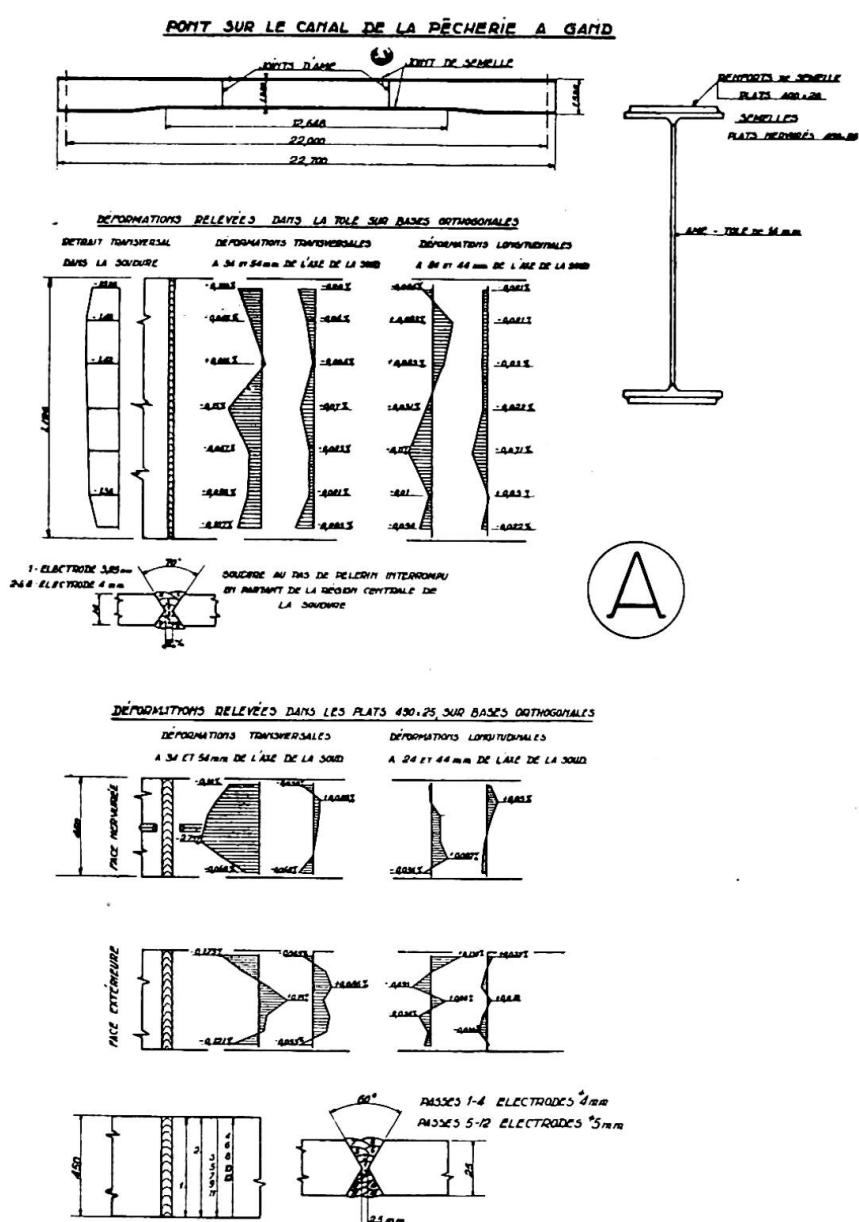


Fig. 16.

1° Pour un angle d'ouverture de chanfrein constant, le retrait transversal croît d'une manière importante et presque linéaire avec l'écartement des plats, donc avec la section du joint ;

2° Pour un écartement constant des plats à assembler, le retrait transversal croît avec l'angle du chanfrein, donc avec la section du joint ;

3° La section du joint étant constante, le retrait transversal croît avec le nombre de passes constituant le dépôt de soudure ; il est donc indiqué d'utiliser des électrodes de diamètre élevé ;

4° La section du joint étant constante, la forme de l'assemblage ne paraît pas influencer d'une manière appréciable la valeur du retrait transversal ;

5° Les observations précédentes (1° à 4°) sont valables pour les soudures à chanfrein symétrique en X et similaires ; ces types de soudure accusant toutefois un retrait transversal considérablement plus faible. Cette diminution paraît due principalement à la valeur plus faible de la section du joint et à la disparition du retrait angulaire, par suite de l'exécution symétrique de la soudure ;

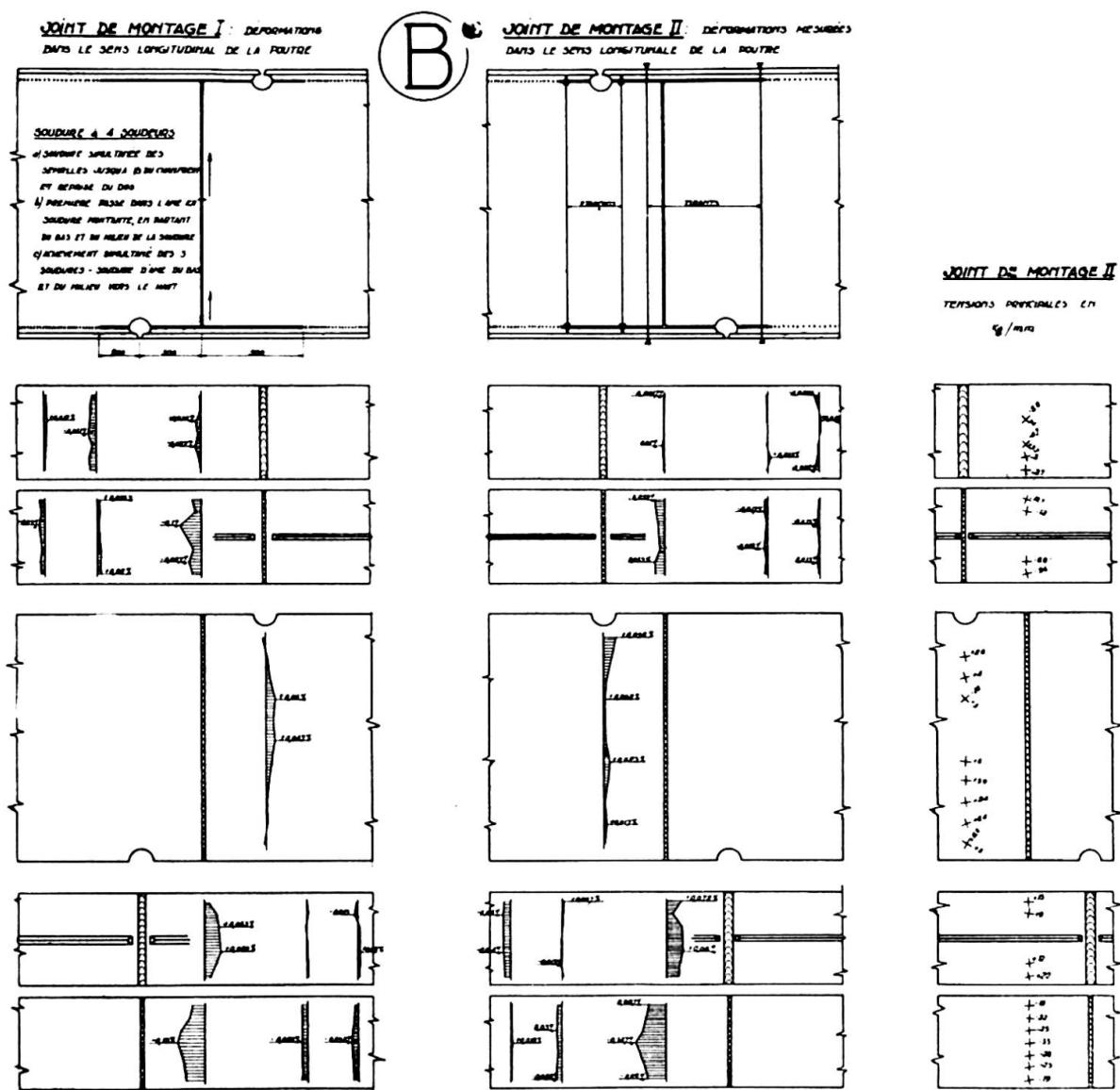


Fig. 16bis.

6° Le retrait transversal ne dépend pas de la longueur des pièces à assembler, il se localise dans les régions voisines de la soudure ;

7° D'une façon générale, la diminution transversale de la section du joint a pour effet une diminution du retrait transversal ; cette diminution doit évidemment rester compatible avec une exécution correcte de la soudure. Subsidiairement, pour réduire le volume des soudures, on doit éviter les renforcements par dépôts de métal d'apport ;

8° Une soudure effectuée en plusieurs passes donne lieu à un retrait transversal plus élevé, si on laisse refroidir chaque passe à la température ambiante, avant de déposer la suivante ;

9° Le retrait est moindre si, après chaque passe, on alterne le sens d'exécution ;

10° La soudure en bout, dont chaque passe relie transversalement les bords du chanfrein, donne lieu à un retrait transversal plus élevé que la soudure en chenille ;

11° Dans la soudure en chenille, le retrait est moindre lorsque les premières passes sont faites aux parois du chanfrein, puis les passes suivantes au centre du joint : on réduit ainsi la section du chanfrein ;

12° Un refroidissement lent donne lieu à moins de retrait que s'il est rapide.

Les principes énoncés ci-dessus sont relatifs à la limitation du retrait transversal considéré en tant que raccourcissement de l'assemblage perpendiculairement à la direction du joint soudé. Ils sont également valables, si l'on a en vue la réduction des tensions résiduelles de soudage. En effet, le bridage ou l'encastrement des pièces à assembler a pour conséquence d'empêcher le retrait transversal (raccourcissement) de se produire et les tensions dues au bridage (tensions indirectes) seront d'autant plus élevées que la déformation empêchée est importante.

Nous avons exposé, au début de cette communication, que la confrontation des mesures du retrait transversal sur un grand nombre d'assemblages soudés en bout, exécutés par deux soudeurs, avait permis d'établir une loi du retrait $\rho_m = 0,179 L_m^c$ dont nous avons par ailleurs signalé toutes les imperfections et le domaine réduit d'application. Quoi qu'il en soit, et en parfaite connaissance de ses possibilités, cette loi est journallement appliquée et avec succès, en vue de la prévision des retraits transversaux, par l'Administration des Ponts et Chaussées. Nous citerons trois exemples d'applications :

a) La poutre de la figure 17 a été réalisée par assemblage de deux demi-profilés : joint soudé longitudinal et un joint transversal. Après sa réalisation, de nombreux trous de rivets ont été faits dans l'âme. Le contrôle

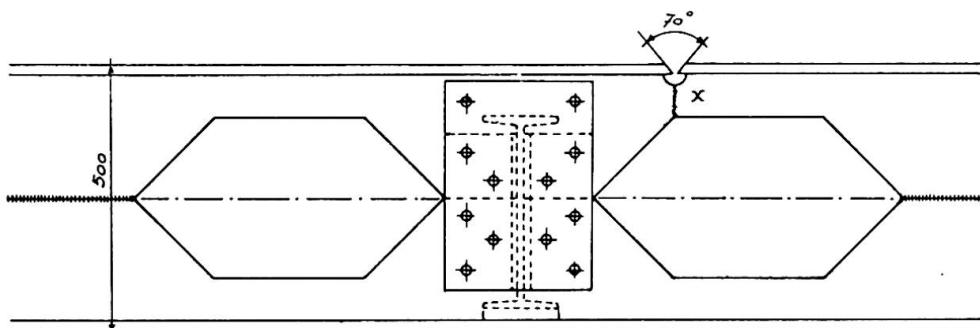


Fig. 17.

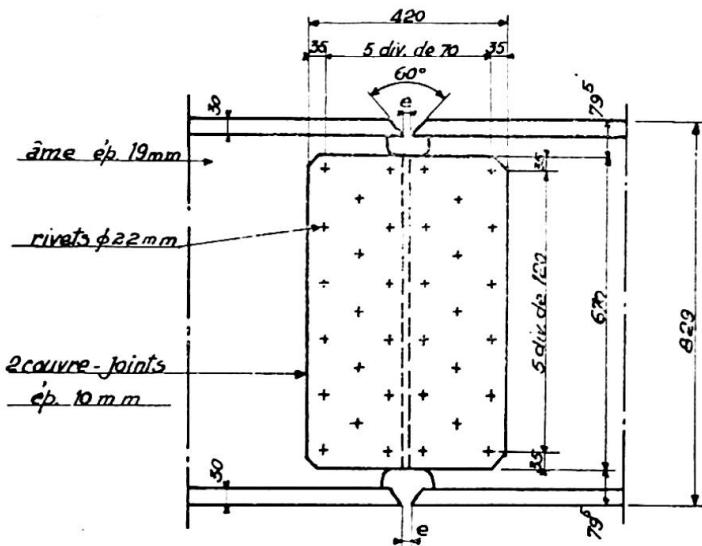


Fig. 18.

radiographique a décelé des défauts tels dans les soudures que celles-ci ont été refusées. La poutre a été découpée suivant le joint longitudinal et suivant le joint transversal soudés. Le joint longitudinal a été remplacé par un joint rivé, tandis qu'il était décidé de faire à nouveau un joint transversal soudé. Par suite de la présence dans l'âme de nombreux trous de rivets, il était indispensable qu'après soudure du joint transversal la poutre ait exactement la même longueur qu'avant le découpage des joints soudés défectueux. Une différence de longueur aurait en effet eu pour résultat la non-coïncidence des trous de rivets de la poutre et des éléments transversaux qui devaient lui être assemblés. L'âme et la semelle avaient des épaisseurs différentes : l'écartement entre les deux tronçons d'âme et les deux tronçons de semelle a été calculé en tenant compte de la formule du retrait établie au cours des essais ($\rho_m = 18 \% L_m^c$). Cet écartement a été prévu différent pour l'âme et la semelle : 2 mm pour la semelle, 3 mm pour l'âme. La soudure était commencée dans la semelle où on a exécuté cinq passes, le retrait de ces cinq passes a diminué l'écartement de 3 mm du chanfrein de l'âme. Après exécution des soudures, la poutre avait exactement la longueur initiale et les trous de rivets concordaient parfaitement ;

b) Les extrémités des longerons multiples d'un pont sous voie ayant souffert lors de la destruction de l'ouvrage, il a été décidé de conserver la partie intacte des longerons à laquelle on rajoutera un tronçon nouveau. En vue de la réduction des tensions résultant de l'exécution d'un joint soudé complet, le joint d'âme a été réalisé par deux couvre-joints rivés, tandis que les deux semelles étaient soudées bout à bout (fig. 18). Pour l'exécution du premier joint, l'écartement e des arêtes des chanfreins de semelle était de 2 mm, le joint d'âme se trouvant dans l'axe des chanfreins. Le retrait dû à l'exécution des soudures des semelles a eu pour effet une compression tellement importante de l'âme des deux tronçons qu'il en est résulté un voilement de celle-ci, voilement facilité par la présence de deux ouvertures au droit des joints de semelle. Les soudures ont été recommandées en prévoyant un retrait égal à 18 % de la largeur moyenne du chanfrein et en écartant les deux arêtes du chanfrein des semelles de cette quantité ; de plus, les soudures des semelles ont été réalisées par deux soudeurs travaillant simultanément. Les résultats ont été très satisfaisants

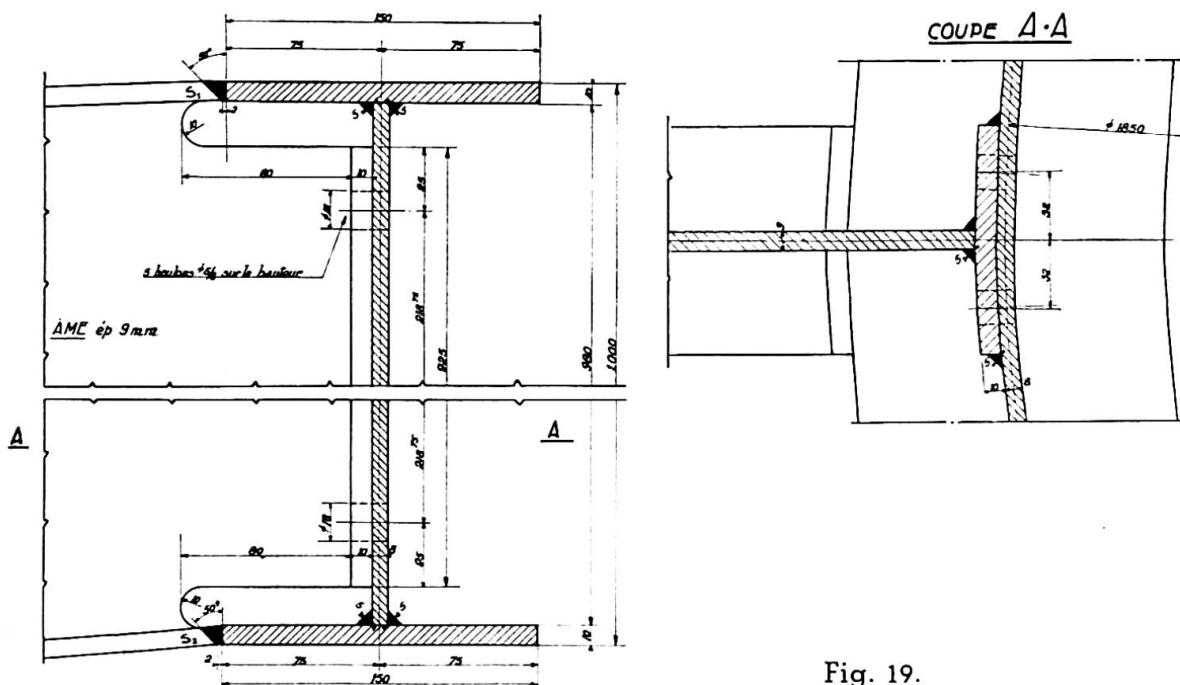


Fig. 19.

pour les neuf joints exécutés, c'est-à-dire que les deux lèvres de l'âme étaient presque jointives accusant un vide apprécié par les plus fines lames d'un canif à épaisseurs ;

c) Dans une importante charpente en forme de dôme, les fermes se raccordent à une poutre circulaire en double T, de hauteur égale à celle des poutres constituant les fermes (fig. 19). Les soudures S. 1 et S. 2 sont exécutées presque simultanément et en premier lieu ; en vue de permettre leur retrait transversal, on a prévu un écartement de 1,78 à 2 mm entre l'arête inférieure du chanfrein et le bord de la semelle de la poutre circulaire, cette valeur correspond à 18 % de la largeur moyenne du chanfrein. L'applique de 10 mm d'épaisseur prévue pour des raisons de montage entre l'âme de la ferme et l'âme de la poutre circulaire se trouve donc écartée de la même quantité de l'âme de la poutre circulaire ; les boulons de montage avaient été desserrés d'autant. Après soudure, l'applique était pour chaque ferme en contact parfait avec l'âme de la poutre circulaire et les deux soudures d'angle fixant l'applique ont pu être exécutées dans de bonnes conditions. Pour aucun des assemblages on n'a constaté de déformation dans l'âme de la poutre circulaire.

Les connaissances du retrait, telles qu'elles résultent déjà des essais nombreux et répétés, peuvent être appliquées d'une manière pratique et concrète lors de l'exécution des soudures. Il n'en va pas de même pour les tensions de soudage, faute d'une connaissance suffisante de leur grandeur et de leur répartition. De ce fait, leur rôle est parfois minimisé dans l'explication des ruptures des constructions soudées. Cependant, l'expérience montre d'une manière indiscutable, et à ce sujet les ruptures des ponts soudés belges en ont fourni suffisamment de preuves, que les tensions complexes de soudure sont à l'origine de toutes les difficultés rencontrées.

Nous avons distingué les tensions directes et les tensions indirectes :

Les premières sont considérées, vraisemblablement avec raison, comme n'exerçant pas d'influence défavorable sur le comportement des assem-

blages. Une réserve est cependant à faire : au cours de l'exécution des joints, la quantité de métal déposé peut ne pas être suffisante pour résister aux tensions résultant de l'exécution même de la soudure et il peut en résulter des fissurations. En règle générale si une soudure peut être achevée, ce qui constitue l'immense majorité des cas, sans qu'apparaissent des fissures, il est fondé de conclure que les *tensions directes* ne pourront pas exercer d'effet défavorable sur le comportement de cette soudure. Il convient cependant de ne pas perdre de vue que ces tensions directes de soudure se composent soit avec les tensions indirectes résultant d'un bridage, soit avec les tensions de service, soit avec d'autres tensions parasites provenant de l'exécution et du montage. Nous avons constaté une rupture explicable, selon nous, de cette façon : un profilé de grandes dimensions est découpé suivant AB, la partie supérieure est retournée de 180° et soudée à la partie inférieure, de manière à réaliser une poutre de hauteur variable (fig. 20). Par suite de libération des tensions résiduelles de laminage, suite au découpage, les deux demi-profilés se sont déformés. Il a été nécessaire de les redresser l'un contre l'autre, au moyen d'étriers, de manière à pouvoir réaliser la ligne de soudure. Après exécution de celle-ci sur toute la longueur de la poutre, on a constaté une fissure partant de la soudure et se propageant dans l'âme perpendiculairement au joint. Il n'y a pas de doute que la cause de la rupture est à trouver dans la composition de la tension longitudinale directe de traction résultant de l'exécution de la soudure et la tension longitudinale de traction résultant du redressage des deux demi-poutrelles. Le « prétexte » de la rupture était une reprise défectueuse de la soudure (donc transversale au joint), reprise qui était malheureusement prolongée dans l'âme par un défaut de celle-ci provenant du laminage (sillon).

Les tensions indirectes de soudure qui résultent d'un empêchement du retrait des éléments à assembler sont déterminantes dans la production des fissurations et des ruptures.

Les accidents survenus aux ponts soudés ne s'expliquent que par l'intervention de ces tensions ; quelles que soient en effet les qualités mécaniques de l'acier, ses caractéristiques chimiques, la température de la zone de transition séparant les ruptures dites de glissement des ruptures sans déformation, il n'en est pas moins vrai qu'il n'existe pas de rupture spontanée, les lois de la mécanique restent toujours applicables et la rupture peut seulement résulter de l'état de tension.

Il est évident que les aciers diffèrent suivant leur élaboration et que leur comportement devant les tensions n'est pas identique : un acier à

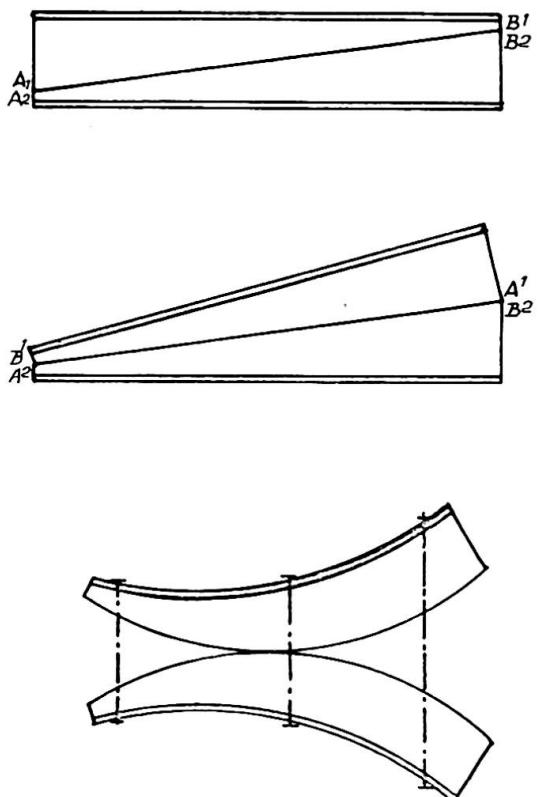


Fig. 20.

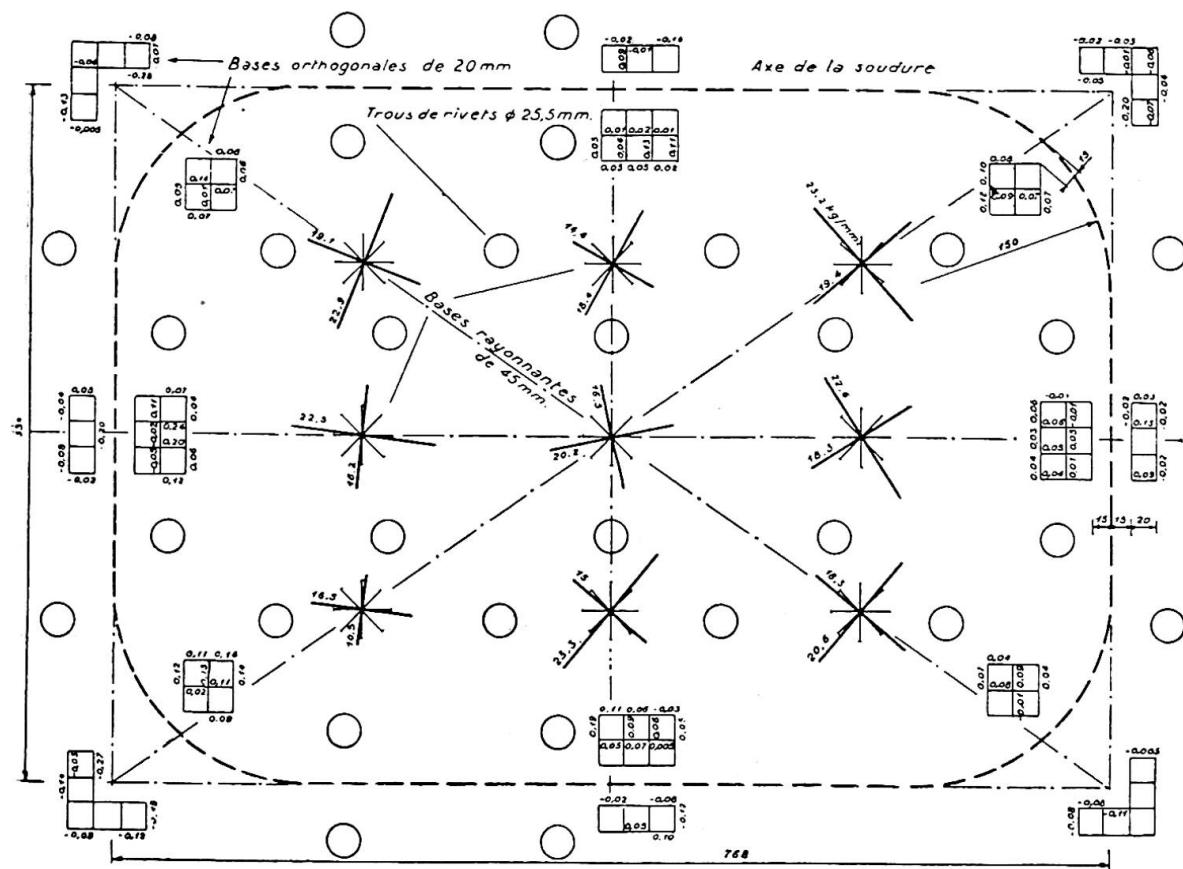


Fig. 21.

grains fins a certainement une propension moins marquée à la rupture sans déformation qu'un acier ordinaire plus sensible aux effets thermiques de l'opération de soudure. Nous ne pensons pas que l'avenir des constructions soudées puisse être assuré à la condition de pouvoir utiliser un acier insensible aux effets thermiques et aux effets mécaniques de la soudure. Un tel acier n'existe pas, tout au plus y a-t-il des degrés dans l'insensibilité à ces effets. D'ailleurs, quelle que soit la qualité de l'acier, un ingénieur accepterait-il de l'utiliser dans une construction, sachant qu'il est sollicité dans ses éléments importants par des tensions de direction quelconque atteignant la limite élastique. Cette valeur peut cependant être atteinte dans toute l'étendue d'un assemblage soudé dont le retrait est empêché, ainsi que nous avons pu le constater lors des mesures faites sur des éprouvettes encastrées. Certaines dispositions constructives peuvent d'ailleurs conduire à la naissance de tensions indirectes qui atteignent la limite élastique. Nous avons eu l'occasion de mesurer de telles tensions résultant d'une disposition que nous avons appelée « disposition en diaphragme » et suivant laquelle un élément mince et d'étendue relativement limitée est soudé sur tout son pourtour à des éléments rigides formant cadre (fig. 21). En vue d'une réparation, une plaque de 768×534 mm, de 18 mm d'épaisseur, avait été introduite dans l'âme d'une poutre en double T rivée, de 4 mètres de hauteur, entièrement terminée et munie de ses raidisseurs transversaux et longitudinaux. Cette plaque avait été fixée sur tout son pourtour à l'âme de la poutre par une soudure bout à bout en V. Cette réparation n'a pas été acceptée ; la plaque a été enlevée et nous avons saisi cette occasion pour mesurer les tensions dont elle était le siège.

Les tensions de réaction provoquées par le retrait empêché de la soudure s'annulent par le découpage du joint soudé. La libération de ces tensions s'accompagne de déformations élastiques dans les tôles, déformations que nous avons mesurées, en vue du calcul des tensions. La plaque étant sollicitée dans toutes les directions, par suite du retrait de la soudure, nous avons déterminé les tensions principales en divers points, par la mesure des déformations élastiques libérées suivant quatre directions à 45° en chaque point. Les points choisis à cette fin étaient les plus éloignés possible de la ligne de soudure, la base de mesure était de 45 mm. A proximité immédiate de la soudure, les déformations varient très rapidement d'un point à l'autre ; il conviendrait, dans ce cas, d'adopter des bases de mesure extrêmement petites, mais les appareils dont nous disposons permettaient seulement d'utiliser des bases de 20 mm minimum. Les déformations ont été relevées suivant deux directions parallèle et perpendiculaire à la ligne de soudure. Les régions ainsi auscultées ont été choisies en raison de l'intérêt particulier qu'elles présentaient : angle de la plaque et mi-longueur des côtés. La mesure des déformations de ces bases orthogonales ne peut fournir de renseignements exacts sur les tensions libérées en ces points, par suite de l'ignorance, dans laquelle on se trouve, de l'orientation et de la valeur des tensions principales ; tout au plus, les résultats obtenus permettent-ils de fournir une idée de la grandeur possible de ces tensions. La plaque rapportée par soudure a été extraite de l'âme de la poutre en réalisant des forages adjacents et alignés suivant l'axe du joint soudé, en prévoyant cependant des arrondis de grand rayon au droit des angles. Dans la région centrale de la plaque, les tensions mesurées sont toutes des tractions. On remarque une certaine irrégularité dans les orientations des tensions principales, mais il faut remarquer que les tensions sont tributaires de la méthode adoptée pour la réalisation du joint soudé et de la présence de nombreux trous de rivets de 20 mm de diamètre. Cependant, la valeur des tensions varie peu en général d'un point à l'autre ; la tension principale maxima atteint 23,3 kg/mm², ce qui est la valeur de la limite élastique apparente de l'acier de la plaque. Les déformations mesurées au voisinage du joint soudé et renseignées à la figure 21 sont exprimées en pour-cent de la base de mesure. Le signe + a été adopté pour les déformations correspondant à un allongement dans l'état contraint, ce qui correspond à des effets de traction. Les chiffres obtenus révèlent des déformations importantes qui, dans l'essai de traction uniaxé, correspondraient à des tensions dont l'ordre de grandeur est la limite apparente d'élasticité de l'acier. Les résultats sont assez irréguliers. Les tensions, près de la soudure, sont fortement influencées par la méthode utilisée pour l'exécution de la soudure. De plus, lors du découpage, la section de métal subsistant entre les trous se réduit de plus en plus ; elle est ainsi fortement sollicitée. Il se peut aussi que, de ce fait, des déformations permanentes s'y présentent qui dépassent notablement les déformations élastiques. Les déformations accidentnelles nuisent évidemment à la précision des mesures faites au voisinage de la soudure.

En conclusion de ces mesures, on peut déclarer, et il fallait s'y attendre, que la plaque et ses abords étaient le siège de tensions résiduelles importantes dues à sa fixation par soudure sur tout son pourtour à une pièce de grandes dimensions fortement raidie et ainsi pratiquement indéformable. Une telle disposition, mais dont l'effet est encore accru, se rencontre dans le rechargement par soudure de trous de rivets, rechargement

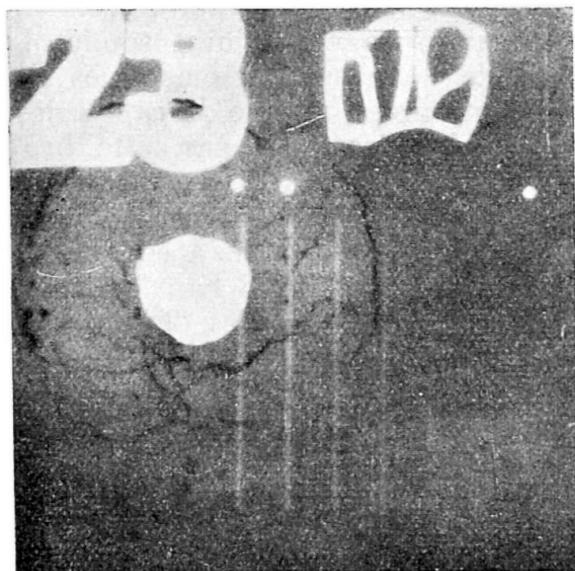


Fig. 22.

exécuté soit en vue d'une mise en œuvre de profilés de remplacement ou afin de corriger l'emplacement défectueux d'un forage. Nous avons constaté, à de très nombreuses reprises, qu'une telle opération est toujours suivie, au bout d'un temps plus ou moins long, de fissurations dans le rechargement proprement dit ou dans la région avoisinante de la tôle (fig. 22).

L'étude des effets du retrait des soudures oriente naturellement vers une recherche de la diminution de l'importance de ces effets, notamment par un choix du type d'assemblage le plus favorable à ce point de vue. La détermination de ce choix conduit immédiatement à établir une comparaison entre les soudures bout à bout et les soudures d'angle. Les résultats des études entreprises sur l'endurance des assemblages soudés élémentaires ont exercé une profonde influence sur le choix de la forme à donner aux assemblages.

Suite à ces travaux, la préférence a souvent été accordée aux soudures en bout, considérées comme présentant une grande supériorité d'endurance par rapport aux soudures d'angle, en raison de la continuité de forme qu'elles permettent de réaliser. En se plaçant au point de vue des effets du retrait, que nous considérons comme le facteur prédominant dans toutes les applications de la soudure, les soudures en bout sont génératrices des tensions résiduelles les plus élevées. Leur exécution peut conduire à un état de tension dangereux, surtout en cas de bridage des éléments à réunir.

Les soudures d'angle sont, à ce point de vue, beaucoup plus favorables. D'ailleurs, la supériorité, au point de vue de l'endurance, des soudures en bout sur les soudures d'angle, a seulement été montrée à propos d'essais de laboratoire, réalisés, répétons-le, à partir d'assemblages élémentaires, et seulement en ce qui concerne la résistance aux effets répétés, c'est-à-dire variant entre 0 et un maximum. Il n'est nullement démontré, au contraire, que les ponts et charpentes en service sont réellement soumis à des épreuves d'endurance ; même si cela était, ils ne sont pas sollicités par des efforts répétés, mais par des efforts variant entre une valeur minimum et une valeur maximum. La valeur minimum de cet effort peut être assez élevée ; elle résulte de la superposition des tensions de poids mort et des tensions résiduelles de laminage, de soudage et de montage. La différence entre ces deux valeurs minimum et maximum est la tension maxi-

mum due à la sollicitation de service. Dans ces dernières conditions d'endurance, la supériorité des soudures en bout sur les soudures d'angle est peu marquée et il est à noter que les essais sont exécutés sur des éprouvettes dont les tensions indirectes de soudures sont nulles.

Dans l'état actuel de la question, nous considérons que, si l'on a en vue la réalisation d'une meilleure continuité de forme, on peut donner la préférence aux soudures en bout, lorsque leur exécution ne donne pas lieu à un empêchement du retrait. En cas de soudure d'éléments bridés, les soudures d'angle sont toujours à préconiser.

Lors de la réparation de l'ossature métallique très gravement endommagée par les bombardements de l'Institut du Génie Civil de l'Université de Liège, nous avons eu à intercaler très fréquemment des éléments nouveaux entre des parties en bon état de la charpente. Systématiquement, nous avons prévu des soudures en bout pour la fixation d'une extrémité de ces éléments, tandis que l'autre extrémité était assemblée à la partie conservée de l'ossature par des couvre-joints fixés par des cordons d'angle latéraux.

En conclusion de ces considérations sur le retrait des soudures et ses effets, nous constatons que nos connaissances du retrait sont encore très incomplètes, en raison de la difficulté de la question et de l'insuffisance d'une documentation chiffrée. Ces connaissances ne pourront s'étendre qu'à la condition de poursuivre les recherches d'une manière coordonnée, allant jusqu'au travail en équipe à l'échelon international.

L'étude du retrait et de ses effets revêt un caractère statistique ; il est souhaitable qu'à propos de l'exécution des constructions soudées, les ateliers et les organismes de contrôle contribuent à enrichir cette statistique, mais en effectuant les mesures d'une manière uniforme, en sériant les variables autant que possible et en notant les valeurs des différents facteurs dont l'influence sur les effets du retrait est déterminante : épaisseur des pièces, section et longueur du joint soudé, diamètre de l'électrode, nombre de passes, programme d'exécution, caractéristiques du courant, programme de soudage, degré de liberté des éléments, etc. Le but à atteindre est de maîtriser le retrait par la prévision chiffrée de ses effets. L'exploitation systématique des résultats des mesures devrait pouvoir conduire à la possibilité de faire jouer aux manifestations du retrait le rôle de précontraintes favorables, introduites intentionnellement dans les constructions, de manière à permettre un réglage des efforts dans le sens de la sécurité et de l'économie et à transformer, par une exécution contrôlée de la soudure, l'élément d'imprévision que le retrait constitue encore, en un élément de prévision ordonnée.

Résumé

D'importantes recherches sont entreprises sur la détermination des effets du retrait.

Les auteurs reprennent sommairement les résultats obtenus à ce jour ; ils exposent le programme des travaux en cours et dont la continuation est activement poursuivie.

Certaines conclusions de l'étude sur le retrait ont été appliquées avec succès sur des constructions et des mesures ont été effectuées sur un pont soudé, au cours de son exécution.

Quelques lois simples, déduites par approximations des résultats com-

plexes des observations, peuvent d'ores et déjà être appliquées avec succès, en vue de la réduction des effets du retrait.

Les tensions indirectes de soudure résultent d'un empêchement du retrait des éléments à assembler ; elles sont déterminantes dans la production des fissurations et des ruptures. L'importance de ces tensions est mise en évidence par un cas concret pour lequel il a été procédé à leur mesure.

Une connaissance approfondie et scientifique du retrait n'est possible qu'à la condition de recueillir le maximum de faits statistiques sur ses effets.

Zusammenfassung

Wichtige Untersuchungen sind im Gange zur Bestimmung der Schrumpfekte.

Die Verfasser berichten kurz über die bis jetzt vorliegenden Resultate und das Programm der laufenden Arbeiten, die stark gefördert werden.

Gewisse Erkenntnisse aus der Erforschung der Schrumpfspannungen sind mit Erfolg bei neuen Bauwerken berücksichtigt worden und an einer geschweißten Brücke wurden während der Ausführung Messungen vorgenommen.

Einige einfache Formeln, die durch Approximation aus den mannigfaltigen Beobachtungsresultaten abgeleitet wurden, können gegeben und jetzt schon mit Erfolg dazu benutzt werden, die Schrumpfekte zu verkleinern.

Die indirekten Schweißspannungen entstehen aus der Behinderung der freien Verformung der zu verbindenden Elemente. Sie sind von grossem Einfluss auf die Rissebildung und den Bruch. Die Wichtigkeit dieser Spannungen wird hervorgehoben am konkreten Beispiel, wo sie gemessen wurden. Eine tiefere wissenschaftliche Kenntnis der Schrumpfekte ist nur möglich durch Verarbeitung von zahlreichem statistischem Material.

Summary

Important research work is being done to determine the effects of contraction.

The authors give a brief summary of results obtained up to now; they explain the programme of work going on and the active pursuance of same.

Certain conclusions of their studies of contraction have been successfully applied to structures and measurements have been made on a welded bridge in course of construction.

A few simple laws, deduced by approximation of the complex results of observation, can henceforth be successfully applied, with a view to lessening the effects of contraction.

Indirect welding tensions arise from prevention of retraction of the parts to be assembled; they are decisive for the production of fissurations and ruptures. The importance of these tensions is stressed by a concrete case in which they were measured.

A thorough and scientific knowledge of contraction is only possible if a maximum of statistical facts concerning these effects are gathered.