

Association Internationale des Ponts et Charpentes
Internationale Vereinigung für Brückenbau und Hochbau
International Association for Bridge and Structural Engineering

DEUXIÈME CONGRÈS
ZWEITER KONGRESS
SECOND CONGRESS
BERLIN-MUNICH, 1-11 OCTOBRE 1936

Contrôle des ponts et charpentes soudés.

Prüfung der geschweißten Brücken und Hochbauten.

The Testing of Welded Bridges and Structures.

F. Campus,

Professeur à l'Université de Liège, Directeur du Laboratoire d'Essais
du Génie Civil.

Reproduction interdite — Tous droits réservés

**TIRAGE À PART EXTRAIT DU RAPPORT FINAL
SONDERDRUCK AUS DEM SCHLUSSBERICHT
REPRINTED FROM THE FINAL REPORT**

VERLAG VON WILHELM ERNST & SOHN / BERLIN 1938

Contrôle des ponts et charpentes soudés.

Prüfung der geschweißten Brücken und Hochbauten.

The Testing of Welded Bridges and Structures.

F. Campus,

Professeur à l'Université de Liège, Directeur du Laboratoire d'Essais du Génie Civil.

Les constructions soudées ne nécessitent pas seulement un contrôle de la qualité des soudures. Elles requièrent un contrôle plus attentif de l'acier et de son usinage que les constructions rivées. Cette remarque n'est peut-être pas assez généralement considérée, elle explique beaucoup de difficultés et d'échecs.

Je n'envisage pas seulement la qualité de l'acier telle qu'elle est définie par des essais normaux. Elle doit être réglée par des essais de soudabilité, tant métallographiques que mécaniques, destinés à combiner avantageusement un métal de base et un métal d'apport convenables. Il importe, dans cet examen, de s'inspirer déjà des dispositions particulières de la construction envisagée.

Les formes spéciales sous lesquelles des pièces d'un acier réputé soudable sont mises en oeuvre requièrent une grande attention. La construction soudée n'a pas négligé l'avantage qu'elle pouvait tirer de l'emploi de pièces laminées, poutrelles ou plats, de fortes dimensions ou épaisseurs. Ces pièces sont d'une production métallurgique assez délicate et peuvent, du fait des opérations thermiques et mécaniques auxquelles elles sont soumises pendant leur fabrication, prendre des propriétés inconnues, leur donnant une individualité parfois mauvaise, souvent susceptible. L'application ultérieure de la soudure à ces pièces peut constituer pour elles une excitation défavorable. Il n'est pas rare aussi que les pièces des constructions soudées subissent des préparations adéquates, souvent des découpages au chalumeau, de formes parfois compliquées. Ces opérations suffisent pour provoquer avant soudure des désordres dans les pièces à assembler. Si ces défauts sont importants, ils sont sûrs au point de vue contrôle, la pièce étant condamnée. Plus grave est le défaut minime, susceptible d'être réparé, voire simplement masqué. Mais dans la gamme de ces défauts, pré-ou post-opératoires à la soudure, il peut en exister d'invisibles, sous forme de fissures indécélables. Comment expliquer autrement la formation de fissures visibles qui ne sont parfois décelables que longtemps après l'épreuve et la mise en service d'ouvrages? Elles n'apparaissent nullement sous l'action des charges et ne présentent pas d'apparence de fatigue, mais une forme tout à fait analogue à celle des fissures spontanées envisagées ci-dessus. Il est d'ailleurs général que ces fissures ne soient pas tout à fait instantanées, mais se produisent au bout d'un temps variable après la manipulation génératrice.

Dans les cas dont j'ai eu connaissance, il a été exceptionnel que la fissure se

soit produite dans la soudure. En général, elle s'étendait dans l'acier de base. Dès lors, en quoi le contrôle de la qualité des soudures pourrait-il garantir contre un semblable accident, se produisant parfois de nombreux mois après réception?

On voit que la construction soudée exige des qualités aussi définies des pièces à assembler que des moyens d'assemblage. Procédé de fabrication de l'acier, méthode de laminage, dimensions des pièces, recuit éventuel, autant de points dont l'importance dans une construction est aussi essentielle que celle de la qualité des soudures. L'usinage a tout autant d'importance: découpage, entaillage, perçage, etc. Des cas de fissuration nombreux, parfois retardés, ont été dus à ces opérations, surtout lorsqu'elles créaient ou laissaient subsister des amorces de fissurations. On préférera donc, pour autant que l'on ne puisse éviter ces opérations, des forages aux poinçonnages, des sciages au cisailage ou le découpage thermique, etc. Pour le moins faut-il meuler ou fraiser les lèvres des coupures, aléser les trous poinçonnés etc., bref ménager le métal autant qu'il est économiquement possible. Enfin, ces conditions: dimensions et formes des pièces élémentaires, façonnage et usinage, sont étroitement liées à la conception complète de la construction. Par cela même, les éléments essentiels de la sécurité et du contrôle résultent, avec leurs importances respectives, de l'établissement du projet. L'emploi de la soudure introduit dans la construction des ponts et charpentes métalliques un caractère de complexité qui constitue une révolution tout à fait analogue à celle du béton armé dans la maçonnerie.

L'analogie avec les particularités du béton armé est réelle à plus d'un point de vue. En ce qui concerne le contrôle, elle est bien propre à éclairer la distinction entre le contrôle de la qualité des soudures et celui des constructions soudées. L'expérience relativement ancienne du béton armé est utile pour éviter les illusions et les outrances. On pratique depuis longtemps le contrôle de la qualité des ciments et des bétons. Mais le contrôle des constructions en béton armé est un point de vue plus complexe. On peut paraphraser à son sujet à peu près tout ce qui est énoncé ci-dessus pour les constructions soudées et l'état pratique actuel du contrôle des constructions en béton armé peut utilement inspirer les tendances autant que modérer les exigences en matière de constructions soudées.

Le contrôle de la qualité des soudures constitue néanmoins un élément primordial de la sécurité des ponts et charpentes utilisant ce mode d'assemblage. On a vu, dans la première partie, les méthodes dont on dispose. Leur application pratique aux ponts et charpentes souffre de sérieuses difficultés, provenant d'une certaine complication, et même des impossibilités dans de nombreux cas. On doit admettre que la soudure dans les ponts et charpentes ne peut faire l'objet d'un contrôle aussi parfait que celui qui peut être appliqué à d'autres objets plus simples, tels que des réservoirs, des pièces de dimensions modérées produites en série, des joints de rails, certaines constructions spéciales mécaniques, etc. Cette énumération suggère d'ailleurs qu'un tel contrôle n'est pas aussi nécessaire pour la charpente ou encore, si l'on préfère, que la conception économique de la soudure des ponts et charpentes doit s'inspirer de l'idée que le contrôle n'est pas absolu, mais relatif et imparfait. La sagesse consiste donc à rechercher et à assurer la sécurité nonobstant cette imperfection et cela est parfaitement possible. Par une telle conception, qui exige une étude spéciale des formes cons-

tructives et des assemblages, on peut atteindre le résultat que, malgré son imperfection, ce n'est pas la soudure qui constitue l'élément le moins sûr de la construction. L'observation précédente, relative à la fréquence plus grande des fissures dans le métal de base que dans le métal d'apport, donne à ce principe toute sa signification en même temps que sa consécration pratique. On peut l'énoncer sous une forme concise: la rupture ne doit jamais se produire dans l'assemblage. Cela est parfaitement réalisable et réalisé, même dans les essais dynamiques de constructions bien conçues. Or, on ne peut pas obtenir un pareil résultat par la rivure.

Si une telle conception est suffisante, ce que l'épreuve du temps doit décider, et provisoirement admissible, il reste utile et nécessaire d'exiger, au point de vue de la qualité des soudures, le maximum de garanties, par un système qui n'est pas loin de s'apparenter à celui en usage en béton armé et qui, à vrai dire, est déjà d'une précision plus grande.

Ces méthodes sont assez généralement appliquées, d'une manière qui ne diffère, d'un pays ou d'une construction à l'autre, que par des modalités. Elles consistent en un ensemble de précautions, fixées par un cahier des charges ou un règlement, et qui sont destinées à créer un ensemble de garanties pratiquement effectives et suffisantes. Pour fixer les idées, j'énoncerai sommairement les prescriptions, appliquées à des charpentes dont j'ai dirigé la construction en Belgique en 1932, 1933 et 1934 et dont les bases figuraient dans un cahier des charges rédigé au début de 1932, premier document officiel de l'espèce en Belgique. Un règlement édité ultérieurement en Belgique n'en diffère guère.

Les conditions préalables sont une conception conforme au principe énoncé plus haut quant à la sécurité des assemblages. Ensuite vient le contrôle de la qualité du métal d'apport. Dans l'hypothèse, réalisée dans le cas envisagé, d'emploi d'acier spécial, ce contrôle doit constituer en même temps une véritable épreuve de soudabilité. Les aciers employés étaient de la nuance 42/50 (type Etat Belge) et 58/65. Pour ce dernier, des examens métallographiques de soudabilité furent effectués. Les essais de réception des électrodes comportaient:

1° Un essai de traction sur éprouvettes cylindriques de 10 mm de diamètre entièrement en métal d'apport déposé, comportant la détermination de la résistance à la rupture, de la limite élastique apparente, de l'allongement mesuré entre repères écartés de 50 mm et de la striction.

2° Un essai de résilience sur éprouvette Mesnager, petit modèle, à entaille en pleine masse de métal d'apport déposé. En variante, des essais furent effectués aussi sur des éprouvettes comportant une soudure en V dans laquelle la rainure était disposée soit dans le sommet du V, soit à l'opposé, soit suivant la bissectrice du V. Le métal de base était en acier 42/50 ou en acier 58/65. Ces essais, moins réguliers, font recommander l'éprouvette dans laquelle la rainure est taillée dans un volume suffisant de métal d'apport, à distance suffisante du métal de base. L'éprouvette à simple soudure en V peut passer pour une épreuve de soudabilité, mais il faut bien définir la position de la rainure par rapport au volume très réduit du métal d'apport.

3° Un essai de pliage d'une plaque en acier 42/50 de 10 mm d'épaisseur après façonnage, de 200 mm de longueur et de 40 à 70 mm (en moyenne 50) de largeur, comportant une soudure en V, pliée sur un mandrin de 30 mm de

diamètre, jusqu'à ce que les deux branches droites soient parallèles (180^0), la soudure étant bien dans l'axe du pliage et le sommet du V au contact du mandrin.

Ce dernier essai pourrait être supprimé et réservé uniquement à l'agrération des soudeurs.

Les essais d'agrération des soudeurs qualifiés et entraînés comportaient :

1° Un essai de pliage comme ci-dessus et, pour le cas d'emploi d'acier 58/65, un essai analogue, mais effectué sur un mandrin de 75 mm de diamètre au lieu de 30 mm. Les éprouvettes peuvent être soudées soit à plat horizontalement, soit verticalement, selon le genre de travaux à effectuer.

2° Un essai de pliage assez particulier, effectué sur une éprouvette en croix analogue à l'éprouvette du règlement allemand. La croix a des branches de 150 mm de longueur totale, de 100 mm de largeur et de 15 mm d'épaisseur. Une branche est formée de 2 pièces soudées l'une à l'autre par des soudures d'angle, ou en V ou en K, selon les cas. Cette croix est ensuite aplatie sous une presse suivant la diagonale, d'abord jusqu'à ce que les branches soient parallèles et écartées de 30 mm, ensuite de 15 mm seulement. L'acier de base était l'acier 42/50. Cet essai est relativement sévère, surtout pour les soudures en V ou en K. Les soudures de ces croix étaient, selon les cas, exécutées horizontalement ou verticalement.

Après agrération, les soudeurs étaient périodiquement astreints à des essais de contrôle, consistant en confection d'éprouvettes ordinaires de pliage, selon 1°. Il est recommandable, pour toutes ces éprouvettes de pliage, surtout pour l'agrération des soudeurs, de procéder à un contrôle métallographique, ou à une série d'essais de dureté, au duromètre *Brinell* ou *Rockwell*, ou à un examen par sciage ou roentgenographique. L'essai de dureté est utile notamment pour vérifier la qualité du métal de base et déceler un traitement thermique éventuel des éprouvettes. L'examen par sciage ou aux rayons X décèle la régularité et la qualité de détail de la soudure. Les soudeurs étant agréés, on organisait une identification des soudures de la construction par la tenue d'un registre, définissant avec précision les soudures effectuées par les différents soudeurs pendant la durée du travail. Toutes les observations quelconques étaient notées en même temps. Le contrôle ampèremétrique de l'intensité du courant de soudure, effectué de temps en temps, peut être étendu autant qu'on le juge utile. Il est incontestable que ces méthodes de réception des matériaux, d'agrération des soudeurs et de surveillance de l'exécution, quoiqu'elles ne procurent aucune garantie absolue, sont cependant supérieures aux méthodes usitées pour le contrôle des ouvrages en béton armé. Il y a belle lurette que les bétonneurs ne sont plus soumis à agrération. Même la vibration du béton n'est pas entourée de garanties personnelles analogues à celles réclamées pour la soudure des ponts et charpentes.

Les soudures étant effectuées, de multiples contrôles sont possibles. Le plus simple est celui des dimensions des cordons d'angle, qui se font au moyen de gabarits, réunis de manière commode en trousseaux. Pour les soudures en V et en X, le façonnage même des pièces, vérifiées avant soudure, détermine les dimensions. Il y a lieu d'examiner s'il n'y a pas eu de déplacements relatifs ou de déformations des pièces assemblées.

Ensuite, il y a l'examen d'aspect de la soudure, assez fallacieux si l'on ne connaît pas les particularités du soudeur. Cependant, certains points sont à consi-

dérer spécialement: les cratères, les reprises, éventuellement les entailles dans le métal de base. Le martelage pour sondage au son, même aidé d'un stéthoscope, est sans efficacité, sauf défaut grave visible à l'oeil nu.

Les méthodes de contrôle non destructives: magnétoscopiques, radiographiques, etc. paraissent d'application souvent incommode et non généralisable sur le chantier et même à l'atelier de charpente. Leur application dans la mesure du possible est certes souhaitable. Le rapport de *M. Berthold* ouvre des perspectives intéressantes, mais il implique une organisation qui n'est pas conforme aux habitudes de tous les pays et dont l'adoption générale est problématique. L'examen magnétoscopique paraît fallacieux. La méthode proposée par *Schmuckler* des fraisages de contrôle est assez pratique mais de signification limitée. Elle a été appliquée aux constructions auxquelles j'ai fait allusion plus haut. Comme il s'agissait d'acier de base 58/65 et de soudure résistante, le fraisage des cordons était difficile. Aussi les opérations étaient elles relativement lentes et coûteuses. Il en a été effectué au total 73 pour 595 tonnes de charpentes (1 forage par 8 tonnes). Sur ces 73 sondages, 5 ont présenté des défauts importants (trous de dimensions appréciables dans le fond des soudures d'angle), 9 des défauts légers (bulles de faibles dimensions). Quelques fissures ont été constatées à l'atelier dans des soudures latérales de jonction de plats à des ailes de poutrelles, par temps très froid, ainsi qu'à quelques soudures sans importance d'extrémités de poutrelles de roulement.

Ce contrôle déjà assez poussé tant au chantier qu'à l'atelier, qui n'est pas usuel en Belgique, a établi que, en dépit des précautions prises pour la garantie des matériaux et de la main d'oeuvre, les soudures présentaient un pourcentage modéré d'imperfections. Ceci justifie les opinions énoncées précédemment sur la nécessité d'en tenir compte dans la conception des constructions soudées, pour assurer une sécurité largement suffisante.

Ainsi qu'il a été dit en commençant, l'acier de base peut comporter autant de défauts que la soudure, ce que révèlent les empreintes *Baumann*, les macrographies et micrographies et aussi les accidents survenus aux constructions soudées, doublement de tôles, tensions internes, écrouissages locaux, amorces de fissurations, surchauffes, etc. Il n'est pas mauvais que le constructeur ait suffisamment à l'esprit l'idée qu'il ne dispose pas de matières parfaites pour ses travaux. Cette notion est supérieure à celle d'une fallacieuse perfection, impossible à réaliser. Elle tempère aussi la notion délicate et ambiguë de l'adaptation. Elle exige pour la conception et l'exécution des constructions soudées des techniciens de haute formation et de grande valeur personnelle et professionnelle. Il est d'ailleurs certain que la rigueur d'un contrôle absolu mais nécessairement a posteriori doit être modérée, dans la pratique des ponts et charpentes, par la notion d'une certaine tolérance, eu égard raisonnablement aux intérêts en cause. C'est ce qui ressort des remarques de *M. Berthold* au sujet du contrôle roentgenographique. Pour une construction sûre et économique, idéal de l'ingénieur, il convient de se préoccuper du contrôle des soudures suffisamment mais sans excès. Le contrôle le plus utile sera sans doute celui du comportement des ouvrages en service, notamment des ponts. Il peut comprendre un examen périodique des soudures, par tel moyen que l'on voudra, analogue à l'examen périodique des rivets.