

LE CONTROLE DES CONSTRUCTIONS SOUDÉES

par F. CAMPUS

Professeur à l'Université de Liège,
Directeur des Laboratoires d'essais des Constructions du Génie Civil

Chapitre I

Considérations générales

Les constructions soudées sont toutes récentes. Leur essor en Belgique date de 1932 et a été plutôt en avance sur celui des autres pays. Cependant, en 1938, nous constatons déjà un développement considérable (1). On a construit plusieurs dizaines de ponts-routes, dont certains réalisent les plus grandes portées de Belgique, de nombreuses ossatures importantes de bâtiments, des portes d'écluses, des grandes vannes de barrages, des ponts-roulants, des charpentes d'engins de levage. Des ponts pour voies ferrées sont en cours de réalisation. Toutes ces constructions ont été exécutées avec succès et dans cette période brève de six années, des progrès ont été réalisés. La construction soudée n'a cependant pas le caractère d'un monopole. De nombreux ateliers de construction ont adopté la technique nouvelle et toutes les firmes importantes la pratiquent actuellement.

Un semblable résultat acquis en peu d'années constitue une révolution dans la construction métallique. Elle a pu être réalisée parce que le terrain avait été préparé depuis un quart de siècle, par les efforts courageux et le labeur opiniâtre et ingrat des firmes spécialistes de la soudure et de leurs chercheurs. Les constructeurs manifestaient une répugnance très vive envers le nouveau mode d'assemblage. Certaines personnalités scientifiques le condamnaient prématurément en Belgique et à l'étranger. Il y a peu d'années, en 1932 exactement, nous avons entendu, dans un grand congrès international d'ingénieurs, exprimer l'opinion que la construction soudée était encore plus mauvaise que le béton armé. Ceci réveille en nous un autre souvenir, remontant à vingt-cinq ans environ. A cette époque, un ingénieur non dépourvu d'autorité nous affirmait que jamais l'on n'exécuterait de ponts en béton armé sous voies ferrées, parce que les vibrations détacheraient les armatures du béton et disloqueraient ce dernier. Beaucoup d'auteurs de ces avis pessimistes sont encore en vie et certains même encore en pleine activité. Les faits ont converti certains, mais pas tous. On voit par là combien l'allure de la technique est rapide et dépasse celle de l'adaptation humaine. L'expression de Freyssinet est exacte : il y a des constructeurs révolutionnaires.

Note de l'auteur. — Le texte qui suit n'a subi aucune modification à la suite de l'effondrement du pont soudé de Hasselt sur le Canal Albert, survenu le 14 mars 1938, entre la rédaction et la publication.

(1) *La Construction Métallique*, n° 1, janvier 1938.

Car la révolution est venue des constructeurs, tant pour la construction soudée que pour le béton armé, et non des soudeurs ni des cimentiers. Il ne suffit pas que l'industrie ait créé les conditions de possibilité : les constructeurs, qui ont toujours les yeux tournés vers l'expérience du passé, hésitent à innover. Certains, plus hardis, osent. Leur responsabilité est lourde. Ayant été appelé à éclairer, par des expériences préalables, la décision à prendre au sujet de l'initiative d'un de nos anciens collaborateurs relative au premier pont soudé sur le Canal Albert et ayant exprimé un avis favorable, ne nous sommes-nous pas entendu demander par diverses personnalités de l'industrie, de l'administration et de l'Université, non seulement si le pont tiendrait, mais si nous nous trouverions dessus lors des épreuves de chargement. Beaucoup de changements sont intervenus depuis lors, certes, et même très rapidement, comme je l'ai montré plus haut. Il n'en reste pas moins vrai que l'on est encore en période de révolution et que le nombre des initiés et adeptes est encore faible.

Quoique dans toute révolution, l'existence de précurseurs soit une nécessité et que leur rôle soit considérable, il importe de les bien distinguer des révolutionnaires. Les industriels de la soudure ont certes fait des tentatives honorables de passer à l'action, même antérieurement à 1932, mais sans retentissement et sans lendemain. Les formes constructives adoptées étaient d'une banalité qui les condamnait ; elles reproduisaient sans avantages des formes empruntées au mode de construction rivée dont la soudure devait provoquer la désaffection. Les occasions offertes ne pouvaient même être avantageusement utilisées. Lorsque, en 1930, fut mise en adjudication la charpente métallique de l'Institut de Chimie-Métallurgie du Val-Benoît, une clause du cahier des charges faisait explicitement appel à une application de la soudure. Le projet dressé était celui d'une construction rivée, mais dont les formes spéciales étaient en fait plus adéquates à la soudure qu'à la rivure. Seulement, en 1930, les conditions n'étaient pas encore favorables pour que nous puissions raisonnablement et avec chance de succès tenter de franchir deux étapes à la fois. C'est pourquoi nous nous sommes tenu à la rivure et fûmes sage ce faisant. Lors de l'adjudication, une seule soumission avait donné suite à la suggestion concernant la soudure, mais, *horresco referens*, elle était bonne dernière : à la fois la plus chère et la plus lourde.

Ainsi que nous l'écrivions en 1931, dans l'*Annuaire de l'A. I. Lg.* (fasc. 3 et 4, pages 159 à 164) :

« ... si nous avions désiré une charpente soudée, » nous eussions dû l'étudier nous-même dans ce » but. Actuellement, nous l'entreprendrions, après » avoir bien examiné le problème... » (Communication faite à la Section de Liège de l'A. I. Lg. le 21 mars 1931).

Effectivement, nous le tentâmes en 1932, pour la charpente métallique de l'Institut du Génie Civil et avec un plein succès. Nous obtînmes la contre-épreuve de l'expérience précédente. Partisan scrupuleux de la libre concurrence, nous avons permis, par disposition explicite du cahier des charges de cette ossature soudée, le dépôt de contre-projets rivés. Il y en eut, mais cette fois ce furent ceux-ci les plus lourds et les plus chers (Voir *R. U. M.*, n° 7 de 1933).

Nous croyons avoir ainsi bien défini le rôle actif des constructeurs dans la révolution constructive. Notons que les industriels de la soudure risquaient moins d'un échec que les constructeurs. L'échec signifiait pour eux le statu quo. Le succès bénéficiait aux deux, car s'il ouvrait un nouveau et vaste débouché à l'industrie spéciale de la soudure, il donnait à l'industrie de la construction métallique une jeunesse nouvelle, qui devait se révéler conquérante et avantageuse. Rien que de logique donc que les efforts de ces deux industries se conjugaient avec succès.

Quant à l'industrie métallurgique, son attitude fut expectante avec raison. Il ne lui seyait guère d'intervenir dans un débat entre la grande masse des constructeurs conservateurs, ses clients de toujours, et la poignée de constructeurs révolutionnaires, plus ou moins alliés aux industriels de la soudure, éventuels clients de demain. Elle n'avait somme toute, qu'à attendre et voir, la conclusion du débat étant seule de nature à retenir son attention et à réagir sur son activité.

Ces considérations ne sont pas inutiles avant d'aborder la question du contrôle des constructions soudées qui intéresse également les trois branches de l'industrie citées ci-dessus. Cette question peut inclure de nombreuses tendances. Le contrôle n'est pas la contre-révolution, mais c'est la réglementation de la révolution. C'est aussi la consolidation, mais dans une telle consolidation, il n'est pas rare que l'influence des anciens adversaires prenne une sorte de revanche. La réglementation des ouvrages en béton armé fait que beaucoup d'ouvrages d'Hennebique, notamment l'élégante passerelle du quai Mativa à Liège, ne pourraient plus être permis actuellement. Il y a là dedans, incontestablement, une grande part de progrès, mais il y a aussi l'effet persistant de concessions aux pessimistes ou aux détracteurs de la première heure, auxquels nous faisons allusion plus haut. Un compromis est souvent une cote mal taillée, nullement conforme en tous points à la raison et à l'expérience et qui demande une critique sérieuse et objective.

Si l'ère du contrôle des constructions soudées est ouverte, la doctrine n'en est pas encore fixée.

Cependant, l'époque est décisive pour l'avenir et elle dépendra des réactions des trois catégories d'industriels envisagées ci-dessus. Le sujet est donc important, opportun et actuel. En octobre 1936, au Deuxième Congrès international des Ponts et Charpentes, à Berlin, nous l'avons abordé à propos de la question du contrôle des soudures, inscrite à l'ordre du jour. L'exposé ci-après est le développement et la suite de ces observations et de notre collaboration active à la rédaction des conclusions correspondantes de ce Congrès, arrêtées par le Comité permanent de l'Association internationale des Ponts et Charpentes à Paris, en juin 1937, et le fruit de nos études antérieures et ultérieures.

Quoique comparaison ne soit pas raison, nous pensons qu'il n'est pas désavantageux, pour l'expression claire de notre opinion, de remonter d'abord aux expériences bien établies du contrôle des constructions en béton armé. Il présente, en effet, une grande analogie avec le contrôle des constructions soudées. D'autre part, le béton armé est une industrie déjà assez ancienne, assez importante et qui a connu assez de succès, pour que les arguments que l'on peut tirer de ses expériences soient accueillis avec attention par les praticiens.

La construction en béton armé intéresse les cimentiers, qui correspondent aux industriels de la soudure, les producteurs de pierres cassées, graviers et sables et d'armatures, qui correspondent aux métallurgistes, et enfin les constructeurs spécialistes, y compris tous leurs auxiliaires. Le contrôle des constructions en béton armé est complexe et comporte un grand nombre d'opérations. Parmi celles-ci, la première et la plus ancienne est le contrôle du ciment ; c'est la plus courante et la plus organisée. Les producteurs s'en réclament et sont ses principaux hérauts. Ils ont fait preuve d'un zèle réel et même parfois excessif dans le progrès de la qualité de leurs produits ; nombreux sont les constructeurs qui actuellement réagissent contre la tendance aux trop fortes résistances des ciments, à cause du manque de déformabilité et de la plus forte propension à la fissuration. Le parallèle est frappant avec la méfiance de certains constructeurs à l'égard des électrodes à haute résistance que les producteurs ont été trop enclins à promouvoir et qui entraînaient des inconvénients présentant une surprenante analogie avec ceux des ciments à durcissement rapide : défaut de déformabilité (fragilité) et tendance plus forte à la fissuration.

En ce qui concerne les graviers, les pierres cassées, les sables, l'eau et les aciers, par une étrange aberration, ces produits qui représentent près de 90% de tous ceux qui constituent le béton armé, n'étaient jusqu'il y a très peu d'années et ne sont encore souvent l'objet d'aucun contrôle. Rien d'étonnant dès lors qu'ils soient souvent ce qui laisse le plus à désirer dans le béton armé et qu'il reste encore un progrès général à faire de ce côté. Il semble d'ailleurs en voie de réalisation et notamment aussi en ce qui concerne les barres d'armature. A notre avis, l'introduction d'un contrôle a nettement

régularisé la qualité. Sans la rendre idéale, elle l'a faite couramment satisfaisante. Le contrôle ne doit pas rechercher davantage.

Nouveau parallèle frappant : dans une construction soudée, l'élément prédominant de beaucoup est l'acier laminé. Nous traiterons plus loin les exigences spéciales requises de ce matériau pour la construction soudée, dont le contrôle est également insuffisamment apprécié, quoique essentiel.

Pour faire du bon béton au moyen de produits garantis par leur contrôle, il faut un bon dosage et une bonne mise en œuvre. On connaît depuis longtemps de bons dosages et les progrès que l'on a proclamés dans ce domaine, il y a une dizaine d'années, étaient plus apparents que réels. Par contre, le facteur mise en œuvre reste essentiel et important. Nous avons gardé le souvenir très vif des précautions que l'on imposait vers 1910 sur les chantiers de bétonnage. Les bétonneurs étaient l'objet d'une agréation régulière ; leur surveillance était attentive et ils pouvaient être renvoyés par une simple déclaration. Nouvelle comparaison inévitable et facile avec les conditions actuelles d'agréation des soudeurs. Seulement, actuellement, c'est-à-dire vingt-cinq ans après, les bétonneurs font encore à peine l'objet d'une semblable agréation ; elle semble devenue superflue. Naturellement, on surveille l'exécution et on a adopté une nouvelle forme de contrôle plus précise que l'agréation des bétonneurs, c'est la confection d'éprouvettes en béton à pied d'œuvre. Cependant, ce contrôle est encore imparfait, car nous avons constaté souvent que ces éprouvettes ont des qualités différentes, en général inférieures d'ailleurs, à celle du béton de l'ouvrage. Finalement le dernier recours est le prélèvement d'échantillons du béton dans l'ouvrage même, méthode qui a l'inconvénient d'être localisée, destructive et à postériori. Le parallèle est saisissant avec les éprouvettes de contrôle effectuées en cours d'exécution des ouvrages soudés et les essais de contrôles destructifs, tels que les fraisages locaux des cordons de soudure.

Le contrôle de l'exécution du béton armé ne se rapporte pas seulement au bétonnage, mais aussi à la constitution correcte du ferrailage, conforme aux plans, supposés bien établis, et d'une manière adéquate à la technique du béton armé. Le contrôle à priori ne garantit pas le bon résultat final. L'armature peut être dérangée par l'opération du bétonnage ou elle peut rendre le bétonnage difficile au point qu'il présente de réelles imperfections : vides, ségrégations, etc. Sauf précautions et surveillance sérieuses rendant ces défauts normalement impossibles, l'ingénieur ne dispose que de moyens de contrôle à postériori. Le plus employé jusqu'à présent est destructif, mais, par suite de ce caractère même, on n'y a recours que dans des cas pour ainsi dire flagrants et désespérés ; ce contrôle est en quelque sorte aussi grave que le mal, parfois pire. Les moyens non destructifs, consistant en examen radiographique, ont reçu des applications, mais si peu étendues qu'on ne peut guère parler de leur

usage pratique. Nous ne ferons pas de prophéties au sujet de leur utilisation future. La possibilité de cet examen à postériori peut certes exercer, par effet moral, une action sur la correction des constructions. D'ailleurs, la radiographie ne permet qu'une certaine vérification de la correction de l'armature, mais pas celle de la qualité du bétonnage, qui est tout aussi importante.

En conclusion, les méthodes de contrôle bien établies des constructions en béton armé sont multiples. Les plus efficaces et les plus appliquées ont trait aux matériaux et à l'exécution. Au cours des dernières années, leur développement a été la condition d'une plus grande hardiesse dans la construction. On peut donc dire que leur application imparfaite dans le passé a cependant permis le succès d'une industrie importante. Certes, des accidents se sont produits. En général, ils ont été la conséquence d'un vice de conception avéré ou d'une malfaçon caractérisée et, par conséquent, d'une absence de contrôle. Sans être absolu ni théoriquement idéal, le contrôle du béton est pratiquement suffisant pour assurer aux ouvrages toutes les qualités raisonnablement requises sans susciter d'entraves économiques. On peut donc dire des bons ouvrages en béton armé qu'ils sont tels que les imperfections inévitables d'exécution ont été tenues assez bénignes, grâce à un contrôle attentif quoique relatif, pour que la fonction soit assurée d'une manière sûre et satisfaisante.

Nous pensons que le contrôle des constructions soudées doit être envisagé de la même manière, dont la compréhension est facilitée par le parallèle que nous avons recherché à dessein. Nous sommes ainsi conduit à formuler une première remarque, d'importance primordiale et qui constituait le thème principal de notre intervention au Congrès international des Ponts et Charpentes à Berlin.

De même que le contrôle du ciment est indispensable mais ne constitue qu'une petite partie du contrôle du béton armé, le contrôle de la qualité des soudures est un élément primordial de la sécurité des ponts et charpentes soudés, donc nécessaire, mais pas du tout suffisant. Le contrôle des constructions soudées consiste, comme le contrôle des constructions en béton armé, en un système complexe d'opérations fragmentaires mais coordonnées, concourant à un même but, qui est, comme pour le béton armé, de créer la présomption la plus grande possible de qualité globale, d'opposer aux imperfections notables le plus de barrières possibles et d'arriver ainsi à un état pratiquement satisfaisant, aussi bien au point de vue économique que technique. Le contrôle de la qualité des soudures ne constitue qu'une partie de ces opérations, importante il est vrai, mais pas prédominante ou exclusive. Pour garantir la qualité d'une construction soudée, il faut encore d'autres contrôles et une assurance suffisante ne peut être obtenue que si, comme pour le béton armé, tout le système complet est appliqué sans lacunes.

Ce qu'il faut ajouter à toutes les opérations du contrôle de la qualité des soudures, qui forment déjà un groupe important d'opérations successives, c'est un contrôle plus attentif de l'acier laminé et de son usinage que pour les constructions rivées. Certes, il est depuis longtemps usuel de procéder à des essais de réception mécaniques et technologiques de l'acier pour les constructions rivées. De ces essais traditionnels, certains sont à conserver. D'autres, relatifs à l'aptitude à la rivure, deviennent superflus, tels les essais de poinçonnage à froid et à chaud. Par contre, ils doivent être complétés par des essais beaucoup plus importants relatifs à l'aptitude à la soudure, ce que l'on appelle communément des essais de soudabilité. Ces essais de soudabilité ont un double aspect. Ils contrôlent l'aptitude générale de l'acier de base à la soudure, tant au point de vue mécanique que métallographique. En outre, ils ont pour but de combiner avantageusement le métal d'apport et le métal de base. Dans cet examen, comme nous le verrons plus loin, il importe de s'inspirer des dispositions particulières de la construction envisagée.

Insistons sur le point qu'une conception exclusivement métallographique de la soudabilité est insuffisante. Les formes spéciales sous lesquelles des pièces d'acier réputé soudable sont mises en œuvre requièrent une attention aussi grande. La construction a rapidement reconnu les avantages qu'elle pouvait tirer de l'emploi des pièces laminées, poutrelles ou plats, de fortes dimensions ou épaisseurs. Le laminage de ces pièces est assez délicat et peut leur conférer des propriétés internes inconnues, souvent défavorables ou les rendant du moins susceptibles, en dépit de la bonne qualité du métal établie par des essais normaux. Le nombre de feuilletages ou doublages de tôles, même minces, qu'il nous a été possible d'observer au cours d'essais de soudure est considérable. Il est certain qu'ils existent aussi dans les constructions rivées. Mais on a rarement l'occasion de les y observer parce que, dans ce mode d'assemblage, des essais capables de les déceler sont exceptionnels et que, d'ailleurs, ce défaut n'a pas de conséquences immédiates ni apparentes. Mais il est assez curieux de noter qu'ayant eu tout récemment à effectuer des essais à outrance sur des goussets rivés de 12 mm d'épaisseur, nous y avons constaté après rupture des caractères nets de feuilletage. On sait aussi que les dispositions de montage par soudure utilisant des tôles interposées, qui avaient été jugées commodes en 1933-34, lors de l'exécution des premiers ponts soudés, ont déçu par suite de la division de ces tôles due au doublage. Des observations analogues ont été publiées déjà par le Prof. H. Dustin dans son commentaire du projet de règlement de l'A. B. S. relatif aux constructions métalliques soudées (*Standards*, n° 5 de 1934).

Certaines pièces peuvent aussi être affectées de tensions internes de laminage. L'application ulté-

rieure de la soudure peut aggraver dangereusement cet état. Il n'est pas rare aussi que les pièces des constructions soudées subissent des préparations spéciales, notamment des découpages au chalumeau

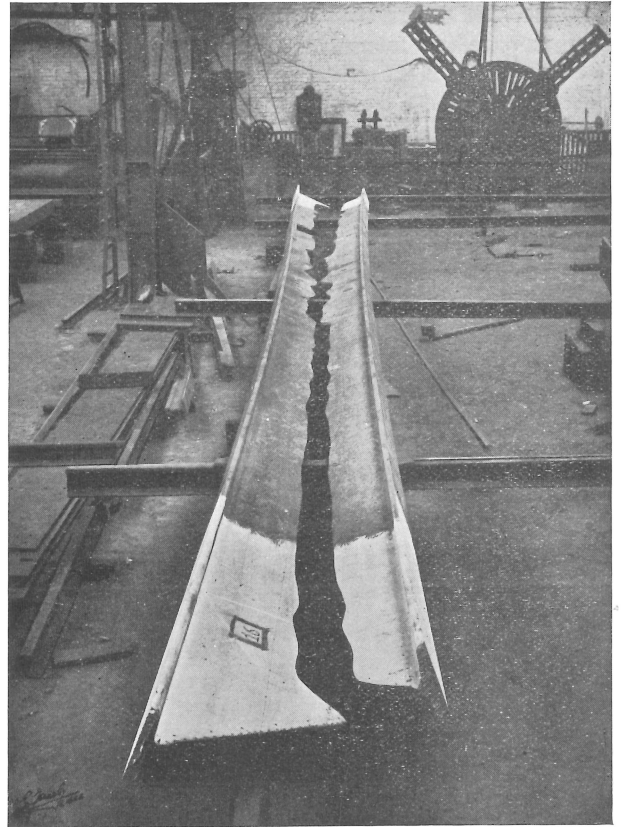


Fig. 1.

suivant des formes parfois compliquées. Ces opérations suffisent pour provoquer avant soudure des désordres tels dans les pièces à assembler qu'elles deviennent inemployables. Les figures 1, 2 et 3 reproduisent quelques cas caractéristiques et qui se passent de commentaires. Il s'agit de désordres résultant uniquement d'un façonnage, avant toute soudure. La figure 3 concerne d'ailleurs une



Fig. 2.

pièce à river. Les causes sont purement mécaniques d'ailleurs, l'action du chalumeau coupeur étant limitée très étroitement au voisinage de la coupure. La flexion des tronçons séparés est l'indice incontestable de fortes tensions internes libérées par la rupture. La naissance de ces tensions internes s'explique aisément par le refroidissement inégal des ailes et de l'âme lors du laminage. Quoiqu'il en soit, des désordres aussi caractérisés sont rares et

d'ailleurs sans danger au point de vue contrôle et sécurité, les pièces se condamnant elles-mêmes. Beaucoup plus dangereuses sont les pièces dans lesquelles peut exister un état de tension interne analogue, mais suffisamment moins accentué pour que la rupture spontanée ne puisse pas se produire. Plus grave aussi est le défaut faible, susceptible d'être réparé ou masqué. D'ailleurs, dans la gamme de ces défauts pré- ou post-opératoires à la soudure, il en existe certainement d'invisibles, même sous forme de fissures indécélables. Il n'est pas possible d'expliquer autrement la formation de fissures visibles qui ne sont constatées parfois que longtemps après l'épreuve et la mise en service des ouvrages. Elles n'apparaissent nullement sous l'action de surcharges et ne présentent pas l'apparence de ruptures

qualités aussi définies des pièces à assembler que des moyens d'assemblage. Composition et fabrication de l'acier, méthode de laminage, dimensions des pièces, recuit éventuel, structure sans défauts, aptitude à la soudure, etc..., autant de points dont l'importance est aussi essentielle que celle de la qualité des soudures.

L'usinage a tout autant d'importance, car on sait que l'action des outils, surtout des plus brutaux, altère le métal et peut donner naissance aussi à des tensions internes, à des amorces de fissures, etc... Quoique localisées, ces altérations peuvent être des origines de fractures. Des cas de fissuration nombreux, parfois retardés, ont été dus à ces opérations, avant ou après soudure, surtout lorsqu'elles créaient ou laissaient subsister des amorces de fissures. Pour autant que l'on ne puisse éviter ces opérations, on préférera des forages aux poinçonnages, des sciages aux cisailages. Le découpage thermique, d'usage très commode, n'est pas une opération brutale somme toute. Cependant, il est recommandable de limer ou fraiser les lèvres des coupures thermiques; le meulage est moins approprié. Si des trous ont dû être poinçonnés, leur alésage à la foreuse est désirable. Bref, on ménagera le métal autant qu'il est économiquement possible et on réduira d'ailleurs les opérations au minimum. On pourrait invoquer en faveur des manipulations plus brutales, en outre d'une éventuelle économie, le fait que leur brutalité même constituerait une épreuve à laquelle ne résisteraient pas les pièces possédant certains défauts cachés, tels que de fortes tensions internes.

M. Dustin (*op. cit.*) recommande le découpage au chalumeau pour déceler les doublures. La précaution est bonne mais ne paraît pas absolue.

Finalement, l'observation facile et économique de ces conditions : dimensions et formes des pièces élémentaires, façonnage et usinage, dépend principalement de la conception, de l'étude et du dessin complet de la construction. Par conséquent, les éléments essentiels de la sécurité résultent entièrement de l'établissement du projet, ensuite du soin de l'exécution et par conséquent de la surveillance et du contrôle. Mais ces éléments ne sont nullement indépendants ni indifférents ni également importants. Nous pensons que l'étude du projet est l'élément essentiel. Un projet bien étudié doit réaliser partout une égale sécurité. Les assemblages étant notoirement, dans tout mode de construction, des endroits déforçés, l'égalité de sécurité suggère de les placer en des endroits peu fatigués. Ceci est nécessaire pour la soudure qui provoque toujours en elle-même ou en son voisinage un affaiblissement. C'est en outre facile, car la soudure permet beaucoup plus de possibilités pour la disposition des assemblages que les chevilles (rivets, boulons, etc...). L'étude aboutit à un projet entièrement défini, jusqu'aux moindres détails, par des dessins et des

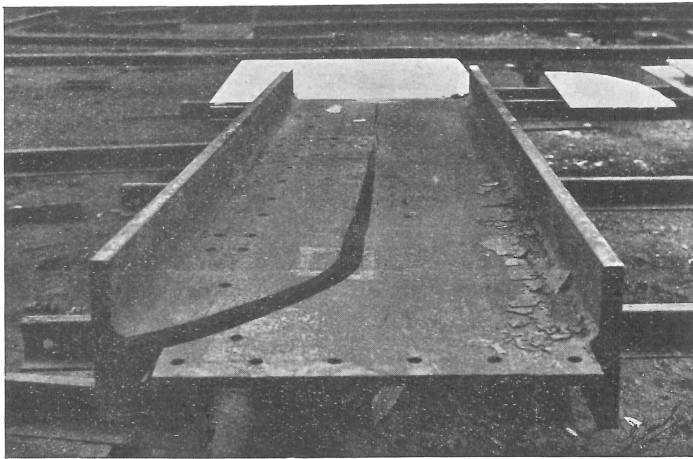


Fig. 3.

de fatigue, mais une forme analogue à celle des fractures spontanées mentionnées ci-dessus. Toutes les déchirures notables, qu'elles soient antérieures ou postérieures à la soudure, se sont produites toujours, à notre connaissance, un certain temps, variant de quelques heures à quelques mois, après la manipulation génératrice. La rupture représentée à la figure 1, par exemple, s'est produite brusquement, avec une détonation violente, alors que la pièce était abandonnée, et ce plusieurs heures après deux coupures obliques faites au chalumeau à chaque extrémité.

Pour ce qui est des désordres constatés après soudure, à part les fines fissures longitudinales dans les soudures que l'on rencontre parfois, les désorganisations les plus graves observées sur les ouvrages exécutés en Belgique n'intéressent la soudure qu'exceptionnellement; en général elles affectent l'acier de base et pas toujours, quoique le plus souvent, au voisinage de la soudure. Comme ces accidents se sont souvent produits plusieurs mois après la réception, on jugera par là que le contrôle de la qualité des soudures ne pourrait suffire à prémunir contre les accidents.

On voit que la construction soudée exige des

notes ; c'est un élément certain pour l'auteur du projet. Le projet est d'ailleurs généralement discuté, revu et contrôlé par plusieurs personnes collaborant au même but ; c'est une garantie de la plus haute utilité. Pour un projet judicieusement établi, la surveillance et le contrôle, tout en étant nécessaires, ont beaucoup moins d'importance. D'ailleurs, ils sont précaires, incomplets et faillibles. Il en résulte que la surveillance la plus attentive et le contrôle le plus strict sont totalement incapables de donner quelque valeur à un ouvrage dont le projet est mauvais, déficient ou vicieux ; ils éviteront tout au plus qu'une mauvaise exécution vienne aggraver les vices congénitaux, mais ils laisseront subsister les tares essentielles de conception. Entre les deux manières, on ne peut hésiter. Cependant, le danger existe que la dernière l'emporte si, par malheur, la notion du contrôle devait prédominer. Je citerai l'exemple d'un pont édifié à l'étranger et cité dans une conférence sur le contrôle des soudures ⁽²⁾. L'ouvrage a été soumis à un contrôle radiographique à posteriori, qui s'est révélé très nécessaire. Mais il est certain que des défauts parmi les plus graves sont provenus de ce que cet ouvrage était conçu d'une manière inadéquate au point de vue de la soudure, ses dispositions étant inspirées d'une manière peu avantageuse des errements de la construction rivée. C'est là un exemple propre à justifier les allégations précédentes et à faire comprendre les désavantages techniques et économiques de la méthode qui, en raison du contrôle, attacherait moins d'importance à une bonne conception. Le risque n'en est pas exclu. Il peut provenir d'un désir éventuel des constructeurs de rechercher une atténuation de leurs responsabilités par le contrôle ou d'une tendance des producteurs à prôner trop le contrôle par raison de propagande pour leurs procédés.

Le contrôle des constructions soudées est complexe, comme il ressortira de l'examen de ses méthodes. Les essais normaux et spéciaux des aciers, nécessairement sporadiques, ne mettent nullement à l'abri des « accidents » de macrostructure. Le contrôle de la qualité des soudures n'est pas plus absolu. Son application pratique aux ponts et charpentes n'est pas toujours commode ; il peut se présenter des impossibilités. Il ne présente pas les mêmes caractères de possibilité que le contrôle d'objets plus simples : réservoirs, pièces de dimensions modérées produites en série, joints de rails, constructions mécaniques spéciales, etc... Pour les réservoirs à haute pression, la sécurité des soudures est certes capitale ; leur contrôle essentiel. Dans ces objets, les soudures sont inévitablement des régions faibles très sollicitées. Mais elles sont aisément accessibles, ce qui facilite l'exécution, la surveillance et le contrôle. Leur sollicitation est généralement statique, autre avantage. Enfin, ces réservoirs peuvent être soumis à une pression d'épreuve de

sécurité, à toute époque, ce qui est finalement la plus grande garantie.

Dans les ponts et charpentes, les conditions ne sont pas les mêmes. Certes, un bon projet doit s'ingénier à faciliter l'exécution des soudures, ce qui n'implique pas cependant la commodité de surveillance et de contrôle. Il serait illicite de préférer à l'emplacement le plus sûr de la soudure l'emplacement le plus commode pour la surveillance et le contrôle. Cependant, l'épreuve de sécurité, le plus souvent mais pas toujours possible, ne donne pas autant de garantie, que pour les réservoirs, parce qu'un excès de surcharge est peu recommandable et que les effets dynamiques, s'ils sont à prévoir, ne sont pas exactement reproductibles, étant mal définis et dépendants de toutes les circonstances possibles. Donc, à la fois la sécurité est moins garantie ou moins définie et le contrôle est moins commode. La saine conception technique et économique de la soudure des ponts et charpentes doit être inspirée de cette idée que le contrôle est précaire et imparfait. La sagesse consiste à rechercher et à assurer une sécurité suffisante nonobstant cette imperfection. Cela est parfaitement possible et c'est en quoi la construction, tout en étant une science, reste un art. Une telle manière de voir exige une étude spéciale des formes de construction, des matériaux et des assemblages. Elle permet d'atteindre le résultat que ce n'est pas la soudure qui constitue l'élément le moins sûr de la construction, malgré ses insuffisances. Les observations précédentes, relatives aux qualités des aciers et à la fréquence plus grande des fissures dans le métal de base que dans le métal d'apport ajoutent à la signification de cette conception et la consacrent pratiquement.

Le constructeur doit toujours avoir à l'esprit qu'il ne dispose pas de matériaux parfaits, pas plus pour la construction soudée que pour la construction rivée. Cette notion est préférable à l'illusion de la perfection qu'aucun contrôle n'est capable de garantir. Elle tempère la notion délicate et ambiguë de l'adaptation.

D'autre part, aucun assemblage n'est parfait. Les assemblages à chevilles (rivets, boulons) sont en principe moins parfaits que les assemblages soudés bien conçus. La soudure permet et permet seule de satisfaire au principe résumant la doctrine précédente : la rupture ne doit jamais se produire dans l'assemblage. La rivure ne permet pas de satisfaire économiquement à ce principe, par nature même. La soudure le permet, tant au point de vue statique que dynamique.

L'épreuve du temps établira si cette théorie est convenable et suffisante. Elle est provisoirement admissible. Elle conduit à l'application de tout l'arsenal des dispositions et moyens de contrôle dont l'examen rapide suivra, par un système qui est apparenté à celui en usage dans le béton armé, mais qui est déjà d'une précision beaucoup plus grande. Quoique le contrôle soit mis à une place subordonnée par rapport à la conception, à l'étude

⁽²⁾ F. Guyot. — Contrôle radiographique par les rayons X d'un pont soudé d'autostrade en Allemagne. *L'Ossature Métallique*, février 1938.

et à l'exécution, il n'en reste pas moins utile et nécessaire et son application n'en doit pas moins être tout à fait consciencieuse et même rigoureuse dans certaines de ses parties. Il ne faudrait pas se méprendre et conclure de ce que nous repoussons la prédominance du contrôle, que nous considérons que son exercice puisse être relâché. Il n'en est rien. La perfection de toutes les parties est nécessaire à celle de l'ensemble. Apprécier l'importance relative du contrôle à sa valeur réelle n'est pas diminuer cette valeur, qui est grande. Un ouvrage bien conçu ne doit pas être mal contrôlé. Un bon contrôle assurera sa bonne exécution, prévue par l'auteur dans le projet. Ce contrôle sera simplement facilité et réduit par la bonne conception et son effet utile sera total. Un ouvrage mal étudié, éventuellement sous l'empire de l'opinion fautive qu'il sera contrôlé de fond en comble et ainsi rendu parfait, reste un mauvais ouvrage malgré un contrôle draconien et coûteux, dont l'effet est, en réalité, inopérant.

Il ne faudrait pas que les ingénieurs-constructeurs considèrent que le contrôle puisse modifier leurs responsabilités et leurs prérogatives. Leur caractère d'auteur de projet et de directeur d'exécution reste intangible. Le contrôle leur apporte uniquement un moyen d'exercer plus complètement leurs prérogatives et une certaine assurance contre les risques qui concernent leurs responsabilités; enfin il réduit au minimum les dangers d'aléas, c'est-à-dire d'imprévus imprévisibles.

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 (3). La connaissance de la construction en béton armé aide certainement à aborder l'étude de la construction soudée. Toutes deux demandent, tant pour la conception et l'étude que pour l'exécution, un personnel technique de formation élevée et de grande valeur personnelle et professionnelle à tous les degrés de la hiérarchie. Cette formation ne peut être limitée à une simple habileté professionnelle relative à la soudure. Il est essentiel qu'elle comporte en outre et tout d'abord une instruction générale et spéciale étendue, permettant une bonne compréhension des phénomènes et des problèmes multiples qui intéressent la soudure et ce à un degré adéquat à la fonction. En particulier, les raisons en vertu desquelles l'A. B. S. recommande de réserver l'étude des constructions en béton armé et des charpentes métalliques à des ingénieurs porteurs de diplômes universitaires sont entièrement valables pour l'exécution des constructions soudées. L'exercice du contrôle requiert nécessairement des connaissances plus spéciales et détaillées sur la soudure, tout comme pour le béton.

Chapitre II

Les moyens pratiques

Les moyens et les méthodes sont assez généralement appliqués d'une manière qui ne diffère d'un pays ou d'une construction à l'autre que par des modalités.

Tantôt ils sont définis par un règlement, d'autres fois par un cahier des charges. Il existe un règlement en Belgique depuis 1935. Sa révision serait déjà utile. Les cahiers des charges, notamment ceux des grandes administrations techniques, suivent d'avantage l'évolution et y contribuent. L'Administration des Ponts et Chaussées vient de charger spécialement un ingénieur de la réception, de l'examen et du contrôle des constructions soudées en même temps que des recherches spéciales sur la soudure et sur la construction métallique en général. Cet ingénieur, qui est un de nos assistants, est attaché à nos laboratoires, aux travaux desquels il collabore et de l'appui desquels il dispose. Cette institution, dont le succès est apparu dès sa création et prouve sa nécessité, constituera pour l'Administration des Ponts et Chaussées une source de documentation de premier ordre, qui aura pour conséquence de parfaire rapidement ses cahiers des charges et ses méthodes.

Pour exposer les moyens de contrôle, nous résumerons d'abord les prescriptions que nous avons établies pour les charpentes soudées des nouveaux instituts de l'Université de Liège au Val-Benoît, dont nous avons élaboré le projet, puis dirigé l'étude et l'exécution en 1932, 1933 et 1934. Ces prescriptions ont paru pour la première fois dans un cahier des charges du 12 avril 1932. C'était le premier document officiel de l'espèce en Belgique. Il avait trait principalement aux soudures d'angle. Un autre cahier des charges, de l'été de 1933, a complété le système pour les soudures bout à bout et en biseau. Les dispositions de ces cahiers des charges en ce qui concerne le contrôle constituent un stade qui est encore en conformité avec les principales prescriptions actuelles. Elles peuvent donc servir de base à notre exposé, d'autant plus que la condition préalable d'une conception conforme aux principes exposés dans le chapitre I pour la sécurité des assemblages était réalisée dans les charpentes auxquelles elles s'appliquaient.

Acier de base. — Il était prévu les essais suivants, pour de l'acier 42-50 kg/mm² type Etat-Belge :

1) Essai normal de rupture par traction sur éprouvette internationale, comportant la mesure de la limite apparente d'élasticité, de l'allongement et de la striction. L'essai est fait dans le sens du laminage pour les barres profilées et les larges plats; pour les tôles dans le même sens et aussi dans le sens perpendiculaire.

2) L'essai de pliage à froid sur des barrettes de 25 cm de longueur et 4 cm de largeur, à arêtes longitudinales émoussées à la lime. Le pliage est fait à bloc (écartement des branches parallèles

(3) F. Campus. — Le béton armé et sa révolution. *Bâtir* n° 18 du 15 mars 1935, Bruxelles.

après pliage égal à la demi-épaisseur de la barrette essayée).

3) Essai d'insensibilité à la trempe, assez empiriquement défini. Les barreaux de pliage comme ci-dessus sont chauffés uniformément au rouge cerise un peu sombre, puis trempés dans l'eau à 28° C après quoi, ils doivent pouvoir satisfaire à un essai de pliage dans lequel les branches parallèles du pli soient écartées de deux ou trois fois l'épaisseur du barreau selon qu'il s'agit de tôles et de plats ou de barres profilées.

Aucun essai de soudabilité n'était prévu. Des essais préalables avaient montré que cette nuance d'acier devait être considérée comme généralement soudable. Les essais d'agrégation des soudeurs devaient d'ailleurs donner tous apaisements à cet égard. Il était par contre prévu, en vue de la rivure, un essai de poinçonnage à chaud et à froid, usuel dans les cahiers des charges de l'Etat. Seulement pour la première charpente, celle de l'Institut du Génie Civil, la S. A. d'Ougrée-Marhay proposa l'emploi d'un acier spécial à haute résistance (58-65 kg/mm²), au carbone-manganèse-cuivre. Cet acier servait à confectionner des palplanches et l'usine avait l'expérience de la soudure de ces palplanches, qui résistait aux actions violentes du battage. Cela constituait une certaine garantie de soudabilité.

Cependant, nous estimâmes nécessaire une étude plus détaillée de la soudabilité. Elle a comporté un examen métallographique et mécanique. Au point de vue métallographique, on a effectué des soudures en V reliant bout à bout deux plats de 12 mm et on a examiné la microstructure de l'acier de base, de la zone de transition et de la soudure. Le même examen a été fait sur des éprouvettes de traction en métal d'apport entièrement déposé à l'arc, mais dont les têtes étaient en acier de base spécial. Les électrodes étaient en acier doux. On a constaté une variation progressive de structure, sans caractère de trempe ou de fragilité. Un essai de trempe à l'air après chauffage à 850° n'a pas montré de structure de trempe, mais bien un vrai recuit. Un essai de trempe à l'eau, après chauffage à 850°, a produit une structure de trempe caractérisée. Un essai de pliage comparatif sur acier spécial non traité, recuit à 850° ou trempé à l'eau a montré une différence très faible entre l'acier non traité et l'acier recuit, qui se laissaient plier tous deux à 90° environ sans rupture, tandis que l'acier trempé à l'eau se rompait après un très faible pliage. On voit d'après cela que, pour l'appréciation de la soudabilité, la notion de vitesse de trempe est essentielle. Le danger de trempe à la soudure est cependant réel, car la chaleur développée intéresse une faible masse de métal en contact avec une grande masse de métal froid; la vitesse de refroidissement peut donc être grande et le résultat de l'essai dépend finalement de l'éprouvette. Il en résulte qu'un essai de trempe rapide à l'eau est à maintenir si l'on veut écarter à peu près certainement tout danger de trempe. Seulement

on écarte par là des nuances d'acier spécial à plus haute résistance qui peuvent être soudables, moyennant certaines précautions. Si l'on envisage l'emploi de tels aciers, on doit renoncer à l'essai de trempe à l'eau. L'essai de trempe à l'air est sans utilité. On doit pour ces aciers procéder à un examen de structure métallographique dans des conditions donnant des garanties suffisantes, en rapport avec la construction.

Finalement, la soudabilité ayant été reconnue, les essais de réception de l'acier ont comporté :

1° L'essai de traction ci-dessus.

2° Un essai de pliage sur barreaux comme pour l'acier 42-50, mais le pliage était arrêté lorsque le pli était à 90°, le rayon de courbure du pli étant de 50 mm pour des épaisseurs de barreaux inférieures à 15 mm.

3° Un essai de résilience sur barreaux entaillés Mesnager (10×10×55).

Cet essai est destiné à écarter les aciers fragiles. Il a rempli son office d'une manière satisfaisante. On aurait pu aussi adopter l'éprouvette de Charpy petit modèle, à condition de modifier les valeurs requises de la résilience.

Il est à noter que si l'acier 58/65 fut accepté pour les pièces de la charpente (poteaux, poutres, longrines) ne comportant guère de soudures, l'acier 42/50 fut maintenu pour les ailes courbes et les goussets des nœuds et les bases des fermes, sur lesquels étaient localisées presque toutes les soudures et certainement les plus importantes. Ces éléments essentiels, peu fatigués, ne formaient d'ailleurs qu'une très faible partie du tonnage total.

Pour la charpente du Laboratoire de Thermodynamique (1933-34), l'acier spécial 58 kg/mm² fut prescrit pour les pièces longues et l'acier 42/50 fut conservé pour les pièces d'assemblage (goussets et bases). La construction entièrement en acier 42/50 était permise en variante. Les essais précédemment définis du cahier des charges de 1932 furent maintenus. Un minimum était imposé pour la valeur de la limite apparente d'élasticité de l'essai de traction. Pour l'essai de pliage à froid, le rayon de courbure du pli devait être égal à 3,5 fois l'épaisseur du barreau. On exigeait l'indication de la composition de l'acier spécial, des preuves quant à l'absence de danger de fragilité et quant à la soudabilité, de même nature métallographique que définie plus haut.

L'attention est attirée sur le fait que les essais de soudabilité s'inspireront avantageusement des conditions de la construction. Ainsi, l'emploi d'aciers de nuances diverses à assembler est susceptible d'influencer l'essai de soudabilité. Il ne faut pas perdre de vue que l'essai de soudabilité ne se rapporte pas seulement aux aciers à assembler, mais aussi à l'acier d'apport et intervient donc dans le choix des électrodes. Ce point est apparu dans l'examen de la soudabilité de l'acier spécial et des électrodes proposées pour la dernière charpente (Laboratoire de Thermodynamique). Les soudures principales y étaient prévues bout à bout ou en

biseau. Le fait qu'il n'y eut jamais à assembler de la sorte deux pièces d'acier spécial, mais surtout des pièces d'acier 42/50 kg/mm² et un métrage moindre de joints d'acier spécial avec de l'acier 42/50 a réagi sur l'examen de soudabilité.

Pour la charpente de l'Institut du Génie Civil, il n'y a eu pratiquement que des soudures d'angle. Le contrôle de l'exécution des soudures a montré que la question de soudabilité naturelle (composition et état physico-chimique de l'acier) est à prendre en très attentive considération lorsqu'il s'agit d'acier de base spécial, se rapprochant de la nuance demi-dure. Il a été fréquemment observé une grande dureté superficielle des cordons de soudure. Des cas de fissures longitudinales de soudures, peu fréquents et groupés dans le temps, ont été constatés. Ils ont dû avoir une cause accidentelle complexe (grands froids, incertitude au sujet des électrodes, ou plutôt de leur enduisage. Celles-ci ont d'ailleurs été remplacées et le phénomène, qui n'a pas pris d'extension, n'est pas reparu).

Réception des électrodes. — Les deux cahiers des charges prescrivaient :

1° Un essai de rupture par traction sur éprouvettes cylindriques de 10 mm. de diamètre, dont le corps est entièrement en métal d'apport déposé. Il comporte la mesure de la limite apparente d'élasticité, de l'allongement mesuré entre repères écartés de 50 mm et de la striction.

2° Un essai de résilience sur éprouvette Mesnager petit modèle, entièrement en métal d'apport déposé.

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 de largeur (en moyenne 50). Elle comporte une soudure en V médiane. Elle est pliée sur un mandrin de 30 mm de diamètre jusqu'à ce que les deux branches droites soient parallèles (180°), la soudure étant bien dans l'axe du pliage et le sommet du V au contact du mandrin. Elle ne peut présenter sur les deux faces ni crique ni fissure après pliage.

Concernant ces essais, nous ferons les observations suivantes : Les éprouvettes de traction en métal d'apport déposé sont assez coûteuses et longues à faire. On a proposé des éprouvettes de traction plates dont une petite partie centrale seulement est en métal d'apport déposé. Une double échancrure de l'éprouvette localise la rupture dans la soudure. On sait que la signification d'éprouvettes non prismatiques est très complexe. On constate que la résistance de la soudure est majorée. On ne mesure ni allongement ni striction, ni limite élastique. Nous ne sommes pas partisan de cette méthode.

Le Professeur H. Dustin, dans son commentaire du projet de règlement relatif aux constructions métalliques soudées (*Standards*, n° 5, 1934), développe avec beaucoup d'autorité le point de vue que nous avons adopté et que nous résumons ci-dessus.

Pour réduire les inconvénients de l'éprouvette en métal d'apport, on l'a constituée de telle sorte que seul le corps soit en métal d'apport déposé, jusque peu au delà des repères (55 mm), les congés et têtes

étant pris dans des tôles d'acier. Nous préférons un petit nombre d'éprouvettes en métal d'apport déposé, définissant ses caractéristiques normales, qu'un grand nombre d'éprouvettes mixtes, sans signification.

Nous avons, au Laboratoire d'essais des constructions du Génie Civil, une grande expérience de ces éprouvettes et nous pouvons affirmer que les résultats sont très réguliers. On doit naturellement confier le dépôt du métal à des soudeurs spécialistes entraînés à ce genre d'opération.

En ce qui concerne les éprouvettes de résilience, on a également critiqué l'obligation de les façonner en pleine masse de métal déposé. Pour la charpente de l'Institut du Génie Civil, on a fait quelques essais en assemblant deux tôles biseautées à 45°, en acier 42/50, par une soudure bout à bout en V et en y taillant les éprouvettes Mesnager de telle manière que la rainure soit dans la soudure. Les expériences ont montré que les résultats variaient sensiblement selon qu'entaille était dans la racine de la soudure, suivant une bissectrice ou dans l'axe de l'ouverture supérieure du V. Il en résulte que ce type d'éprouvette n'est pas recommandable, sauf éventuellement pour un essai de soudabilité, suggestion qui mériterait d'être étudiée. Mais on peut choisir un moyen terme en écartant les deux tôles biseautées de 15 à 20 mm au lieu de 55, de telle sorte que l'entaille se trouve toujours en pleine soudure homogène, quoique environ le tiers seulement de l'éprouvette soit en métal d'apport déposé par fusion.

Un point important est à noter aussi : les spécifications définissaient pour la tension de rupture comme pour la limite apparente d'élasticité des minima et des maxima. Par contre, pour l'allongement de rupture et pour la résilience, seuls des minima étaient prescrits. Cette mesure est en rapport avec une observation déjà faite plus haut et a pour but de freiner la tendance, sans utilité pour la construction des ponts et charpentes, de fabriquer des électrodes à haute résistance, nécessairement peu ductiles, fragiles et susceptibles de fissuration. Elle concorde avec la conception générale exposée au chapitre I, prévoyant l'emplacement des soudures aux endroits peu sollicités. La haute résistance n'a donc pas d'utilité, en général, et par contre, elle a les inconvénients indiqués. Cette disposition, peu appréciée en 1932, est à l'heure actuelle en voie d'être plus généralement reconnue. Le règlement de 1935 de l'A. B. S. l'a d'ailleurs adoptée.

Les cahiers des charges définissaient le nombre d'essais en proportion de l'importance des fournitures, tant pour l'acier de base que pour les électrodes.

Agrégation des soudeurs. — L'examen d'agrégation des soudeurs inscrit au cahier des charges de 1932 comportait les épreuves suivantes :

1) Confection de quatre éprouvettes de pliage à froid, en acier 42/50 comme pour l'essai de réception des électrodes, dont deux soudées horizontalement et deux soudées verticalement ; ces éprouvettes

doivent pouvoir être pliées comme il est dit plus haut.

2) Confection de deux éprouvettes en croix, en acier 42/50, de la forme définie à la figure 4. Ces éprouvettes sont soudées l'une horizontalement, l'autre verticalement. Elles sont écrasées à froid

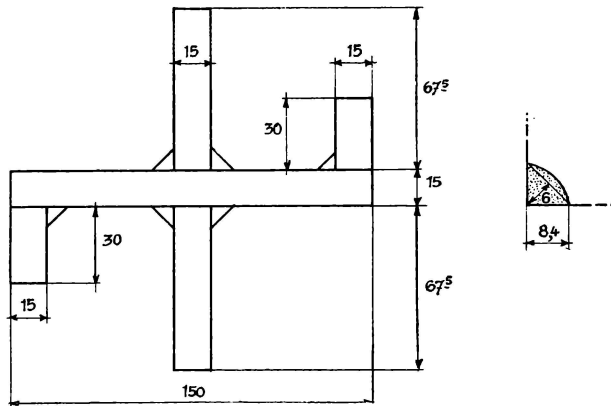


Fig. 4.

sous la presse suivant une bissectrice jusqu'à ce que les écarts deux à deux soient de 30 mm (réglés par les taquets). Après ce pliage la soudure ne peut présenter ni criques, ni fissures, ni décollements dans toutes les parties de l'éprouvette. Les taquets sont ensuite abattus et le pliage est continué jusqu'à ce que l'écartement des branches soit réduit à 15 mm. Dans ces conditions l'éprouvette peut montrer de légères déchirures ou glissements à la jonction des soudures et des tôles, mais pas de déchirures profondes, ni de décollements, ni de ruptures dans les tôles.

Après pliage, l'éprouvette est sciée par le milieu, sommairement polie et examinée macroscopiquement après attaque au moyen d'une solution de chlorure cuivreux ammoniacal (au 1/12); on peut aussi prendre l'empreinte Baumann. La soudure doit être intimement adhérente à la tôle jusqu'au fond des 4 angles. Les fissures partant des bords extérieurs des cordons de soudure ne peuvent s'étendre jusqu'à la racine de la soudure et ne peuvent avoir le caractère de décollements indiquant un manque de liaison intime entre le métal de base et le métal d'apport.

Telles étaient les épreuves prévues par le cahier des charges pour la soudure d'acier 42/50. L'initiative de la S. A. d'Ougrée-Marhayé d'employer de l'acier 58-65 nous obligea à prévoir une épreuve supplémentaire de pliage, analogue à celle définie sous 1° ci-dessus, mais confectionnée au moyen de plats d'acier 58-65 et pliée jusqu'à parallélisme des branches sur un mandrin de 75 mm de diamètre.

Aux quatre éprouvettes de pliage en acier 42/50 prévues au cahier des charges ont été substituées deux éprouvettes de cette nature, soudées l'une horizontalement, l'autre verticalement — et deux éprouvettes de pliage en acier spécial, soudées de même.

La figure 5 représente quelques éprouvettes des deux types après pliage, dont certaines sont rompues.

Ces épreuves appellent les observations suivantes : L'essai de pliage a le double aspect d'être prescrit pour la réception des électrodes et pour l'agrégation des soudeurs. C'est qu'il répond à ces deux buts. Comme essai de réception des électrodes, il est caractéristique de la ductilité du métal d'apport et du métal de base. Par une graduation de l'éprouvette, il permet une mesure de répartition des allongements (fig. 5). Cependant l'hétérogénéité causée par la soudure complique l'interprétation de l'essai, comme H. Dustin l'a très bien montré (*op. cit.*).

D'autre part, il exige de hautes qualités de la part du soudeur : excellente pénétration et dépôt d'un joint homogène et ductile. Cependant, après soudage, les éprouvettes sont rabotées sur les deux

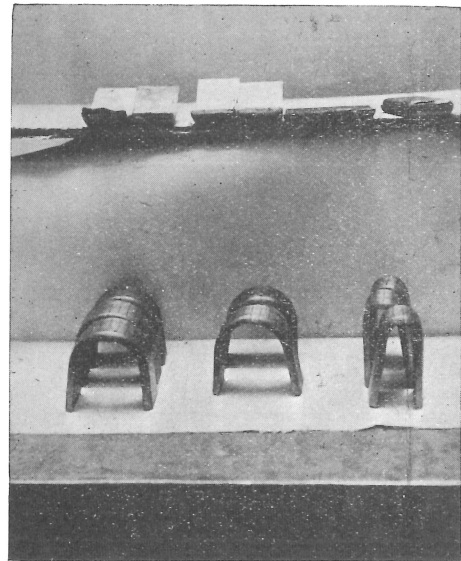


Fig. 5.

faces et ramenées à 10 mm d'épaisseur (au lieu de 12 initialement). Il en résulte que la racine et la partie supérieure de la soudure sont éliminées. Or, ce sont les points les plus difficiles. La pénétration peut laisser à désirer à la racine, elle peut contenir des scories et, à la partie supérieure, il peut y avoir des morsures dans les plats. A notre avis, pour un examen de soudeur, le fraisage des éprouvettes de pliage devrait se borner à enlever les aspérités de la soudure et à rétablir l'épaisseur uniforme de l'éprouvette, rendue bien plane à la presse si les précautions prises pour éviter la déformation angulaire de retrait ont été insuffisantes. Si l'épaisseur de 12 mm est trop forte, rien n'empêche d'opérer sur des tôles de 10 mm. Eu égard à ces incertitudes, à la signification complexe de l'essai, de même que s'il révèle des particularités, il est recommandable

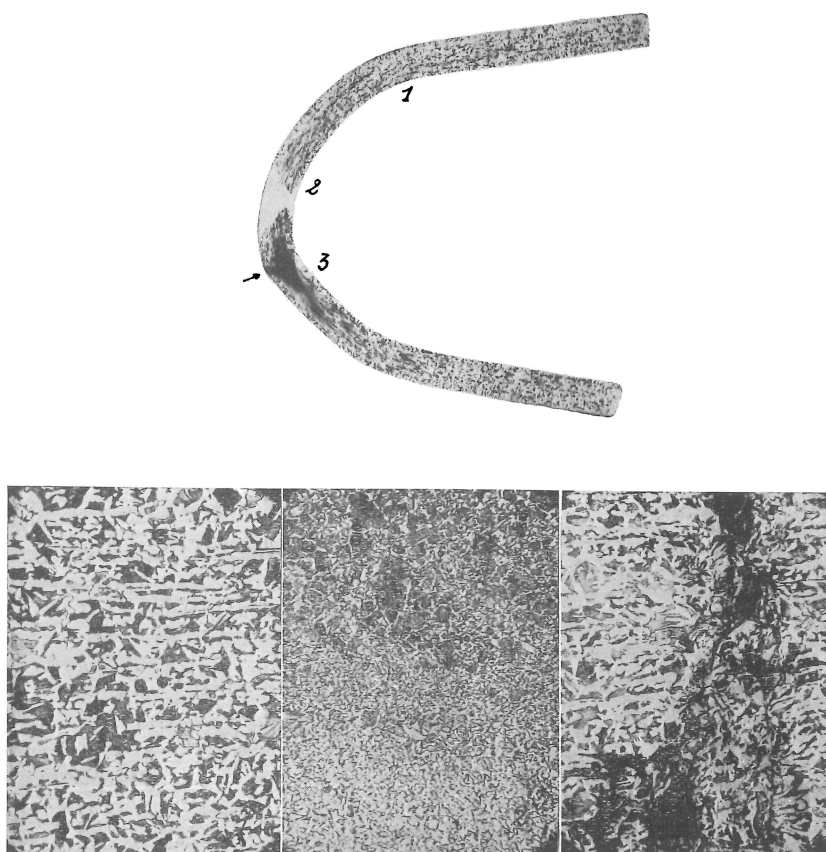


Fig. 6. — Empreinte Baumann et micrographies d'une éprouvette soudée de pliage, en acier 58/65, rompue à l'endroit d'une grosse inclusion.

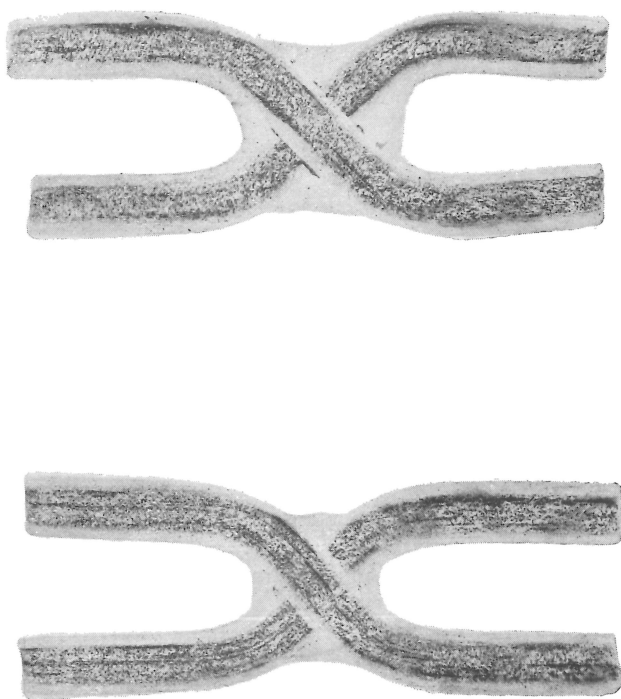


Fig. 7.

de scier l'éprouvette et d'en faire une macrographie (fig. 6).

Pour ce qui est des éprouvettes de pliage en croix, qui constituaient une innovation, elles étaient le fruit de nos réflexions qui nous avaient conduit à croire que la qualité essentielle à exiger d'un soudeur, c'est qu'il fit réellement des soudures, c'est-à-dire des assemblages intimes par fusion, et non des collages. Notre postulat n'était pas mauvais, puisque l'exercice du contrôle à posteriori, sur un pont « exceptionnellement défectueux » a, selon M. F. Guyot (*op. cit.*, 1938) montré que : « Les défauts les plus fréquents et qui ont motivé la condamnation des joints sont le manque de pénétration, le manque de liaison qui l'accompagne souvent et les fissures de tension ». Nous avons toujours été particulièrement impressionné par les pièces d'acier doux déformées de manières extravagantes et bizarres par lesquelles les aciéries montrent parfois, au public des expositions, les qualités de déformabilité de leurs aciers.

S'il nous fallait proposer une devise pour les bonnes soudures, nous choisirions : « Je plie et ne romps pas ». De là l'idée des éprouvettes de pliage en croix.

Le règlement allemand de 1931 (revu le 25 août 1934) prévoyait aussi des éprouvettes en croix pour l'examen des soudeurs, mais les soumettait à un essai de rupture par traction. C'est à notre avis une erreur, qui provient toujours du point de départ que nous contestons : tendance aux fortes résistances dans les soudures. C'est précisément là ce que l'on réalise le plus facilement, mais ce n'est pas du tout ce qui importe. Une résistance suffisante à la rupture ne donne même pas l'assurance d'une bonne pénétration générale.

L'essai de pliage en croix a été effectué un grand nombre de fois pour la charpente de l'Institut du Génie Civil ; il a donné toute satisfaction. La figure 7 montre des empreintes Baumann de deux éprouvettes pliées, la figure 8 montre diverses éprouvettes.

Pour être agréés, les soudeurs devaient réussir les six éprouvettes sans défaillance. Un échec pour une éprouvette obligeait à une nouvelle épreuve après quinze jours minimum. Un nouvel échec de même que l'échec d'emblée pour deux éprouvettes faisaient ajourner les candidats à trois mois. Ces épreuves étaient donc sévères.

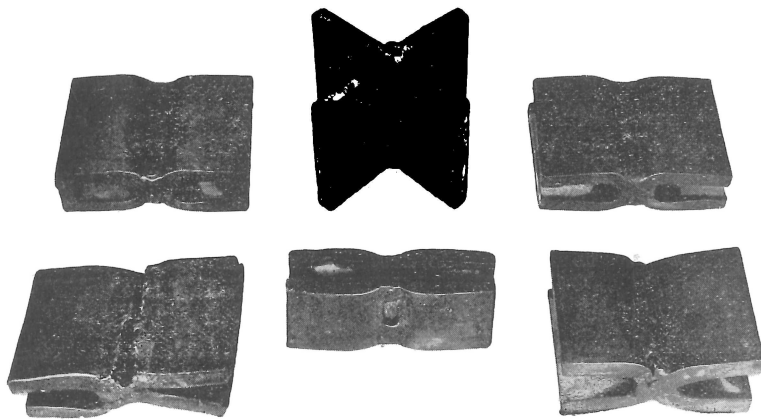


Fig. 8.

Pour la charpente du Laboratoire de Thermodynamique (1933), les mêmes essais de pliage étaient conservés pour l'agrégation des soudeurs, à savoir deux éprouvettes en acier 42-50 et deux éprouvettes en acier spécial, une soudée horizontalement et une soudée verticalement pour chaque type d'acier.

L'éprouvette de pliage en croix était conservée, mais sous la forme modifiée de la figure 9. Au lieu d'être façonnée au moyen de soudures d'angle, elle

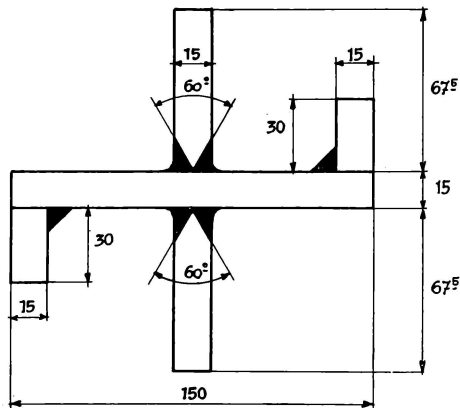


Fig. 9.

comportait des soudures en biseau, pour la raison que les soudures principales du projet de charpente étaient des soudures bout à bout ou en biseau, sans solution de continuité. L'essai de pliage en croix en devenait certes beaucoup plus difficile. D'abord, les soudures en biseau sont parmi les plus difficiles, à cause de l'angle très aigu. Ensuite, la forme du nœud devient beaucoup moins favorable ; des concentrations de tensions doivent se produire dans la soudure à l'angle. Pour les atténuer, il convient d'élargir quelque peu la base de la soudure et la réaliser avec un très léger chanfrein, mais ces aménagements doivent être très modérés, sinon ils aggravent la difficulté de l'essai. En tout état de cause, la soudure est plus sollicitée que dans les éprouvettes en croix à soudures d'angle. La figure 10

montre deux résultats caractéristiques. La pénétration à la racine est insuffisante. Les ruptures se produisent toujours dans le plat continu, à la naissance des soudures. L'expérience a montré que cette épreuve était très sévère et exigeait des soudeurs d'élite.

Contrôle de l'exécution. — Il comporte un ensemble de vérifications et d'épreuves, qui doivent nécessairement être confiées à des surveillants consciencieux et instruits. Ces opérations doivent aussi être faites très systématiquement et enregistrées. La vérification du traçage n'est pas différente en principe de celle des char-

pentés rivées. Il y a lieu de tenir compte du retrait probable dans les dimensions des pièces. L'examen du perçage est remplacé par celui des préparations spéciales éventuelles : rabotage des tranches pour

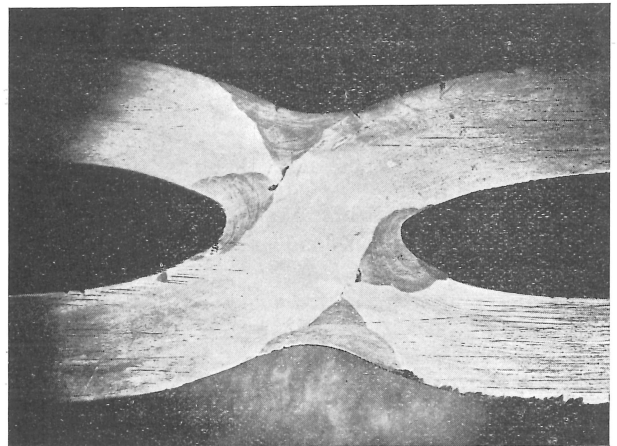
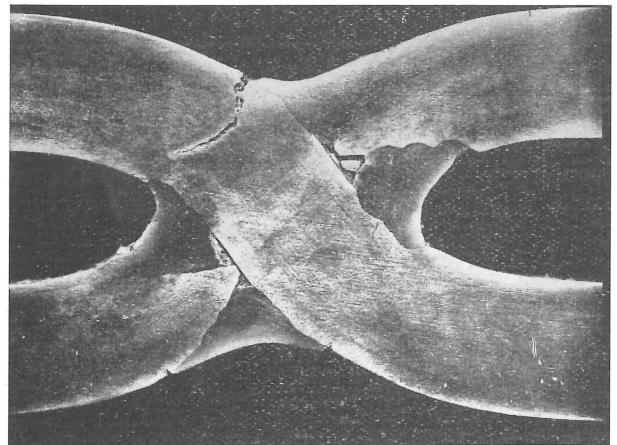


Fig. 10.

les soudures d'angle, chanfreinage ou biseautage pour les soudures bout à bout. Les dimensions de ces préparations, surtout celles des angles, doivent

être bien vérifiées, car elles déterminent les dimensions des soudures bout à bout. Il est très facile d'établir des gabarits de contrôle.

Pour les soudures d'angle, l'opération la plus élémentaire consiste dans la vérification des épaisseurs des cordons. Nous avons trouvé que le plus commode était d'opérer au moyen de calibres, dont nous avons fait pourvoir les surveillants (fig. 11).

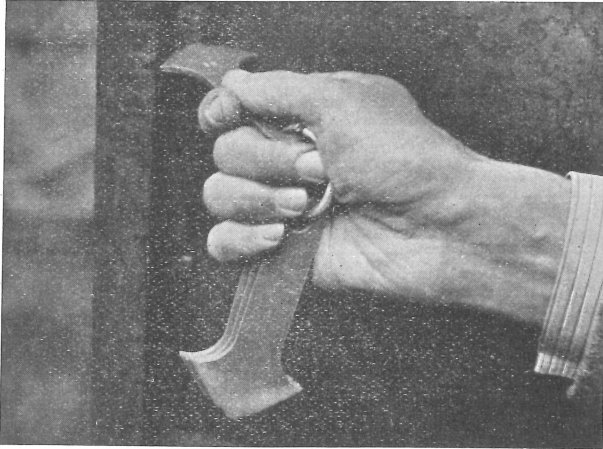


Fig. 11.

Dans tous les cas, il y a lieu d'examiner après soudure si les pièces n'ont pas subi de déplacements relatifs ou de déformations. Les soudeurs agréés étant pourvus d'un indicatif, il est tenu un registre de soudure indiquant journallement les soudures effectuées par chacun d'eux et les repérant exactement. Le cas échéant, elles sont marquées au poinçon de l'indicatif du soudeur. Ceci est indispensable pour la suite organisée et économique du contrôle.

Les cahiers des charges des charpentes soudées du Val-Benoît prescrivait que, en cours d'exécution des soudures et à toute époque, des examens de contrôle pouvaient être imposés aux soudeurs, consistant en une éprouvette de pliage à froid. En cas d'échec, l'épreuve est recommencée en double et, en cas de nouvel échec, le soudeur est exclu et doit être soumis à un nouvel examen d'agrément après un délai minimum de quinze jours. Cette situation s'est effectivement présentée. La disposition a pour but d'éviter le relâchement du soin des soudeurs, qui pourra t résulter notamment d'une tendance à

un avancement trop rapide au détriment de la qualité.

Pour les soudures au plafond, dont l'exécution est subordonnée à une autorisation spéciale, les soudeurs sont soumis à une agrément préalable consistant en soudure au plafond d'une éprouvette de pliage. Cette épreuve est d'ailleurs réservée aux meilleurs soudeurs.

Contrôle des soudures achevées. — En ce qui concerne le contrôle des soudures mêmes, l'examen d'aspect est sans signification. Les soudures les meilleures ne sont pas celles qui ont le meilleur aspect. Cependant, certains points sont à considérer spécialement : les cratères, les reprises, éventuellement les morsures dans le métal de base. Des études au sujet des effets de ces particularités seraient très utiles. Un examen au son, au choc du marteau, même à l'aide d'un stéthoscope, est sans efficacité.

Pour ce genre de contrôle, la meilleure solution consiste en une observation fréquente et attentive du travail des soudeurs avec mesure ampèremétrique éventuelle de l'intensité de l'arc. Dans cette surveillance, on s'inspirera des résultats des examens d'agrément et elle sera à son tour déterminante des examens périodiques de qualification. Toutes les remarques importantes faites au cours de la surveillance des travaux de soudure seront inscrites au registre pour orienter le contrôle effectif de la qualité des soudures d'œuvre.

Ce dernier ne peut-être qu'à postériori, c'est son principal défaut. S'il décèle un travail généralement

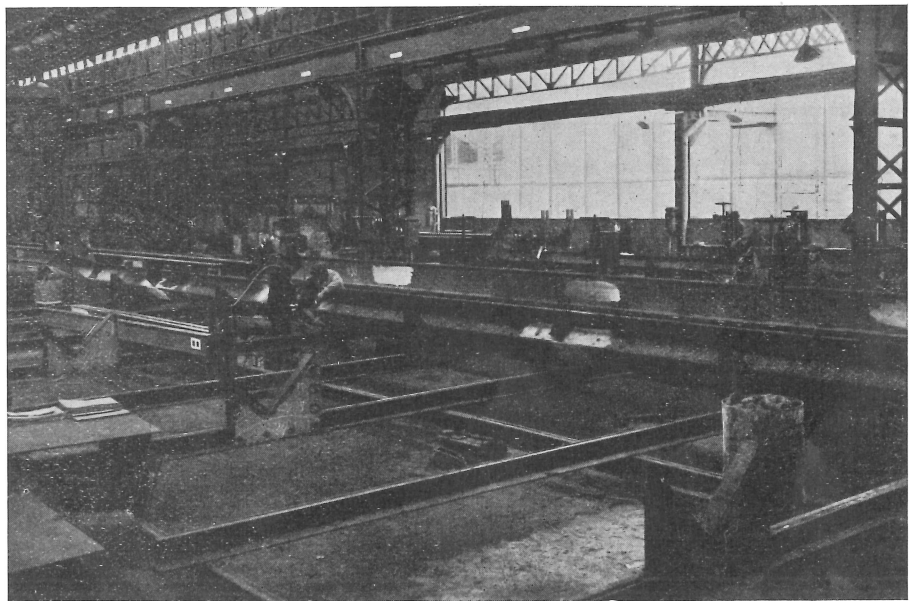


Fig. 12.

mal fait, il peut certes prévenir des accidents, voire des catastrophes, mais il n'empêche pas des pertes considérables d'argent et de temps, qui peuvent être très graves aussi, et il expose à des conflits et difficultés de toutes natures. Rien ne peut remplacer un contrôle préventif et c'est pourquoi,

malgré l'imperfection fondamentale des méthodes exposées jusqu'à présent, nous professons cependant qu'elles sont les plus utiles et les plus importantes.

Les méthodes de contrôle à posteriori des soudures sont de deux types : les méthodes destructives et les méthodes non destructives. Les premières consistent à effectuer des sondages dans les cordons de soudure, soit par des forages ou par des fraisages au moyen de petites machines spéciales du genre de celle de Schmuckler.

Nous avons fait construire une petite fraiseuse mobile à axe flexible pour le contrôle de la soudure de la charpente de l'Institut du Génie Civil. Les figures 12 et 13 représentent des contrôles effectués à l'atelier et au chantier. La figure 14 représente un fraisage satisfaisant. La figure 15 représente deux fraisages montrant une soudure défectueuse. Il a été effectué au total 73 fraisages pour 595 tonnes de charpente (1 par 8 tonnes). Ces sondages ont



Fig. 13.



Fig. 14.

peut faire au procédé sont d'opérer à l'aveuglette et de détruire éventuellement des parties bien soudées, dont la recharge est incertaine. Cependant, quand un fraisage donne un résultat défectueux dans une soudure, il est tout indiqué de multiplier les sondages pour la soudure en question (fig. 15) pour déterminer l'étendue du défaut. Au bout de quelques contrôles, en s'aidant du registre des soudures et de l'observation des soudeurs, les sondages peuvent se faire d'une manière qui n'est plus livrée entièrement au hasard, mais est alors empreinte d'un préjugé. La prédominance des résultats favorables, tout en étant très heureuse, laisse subsister le reproche de forages inutiles et, somme toute, nuisibles. Les résultats de ce contrôle confirment les opinions exprimées dans la première partie. Ce qui précède établit que les précautions les plus grandes avaient été prises pour l'exécution et que la surveillance avait été attentive. Cela n'a pas empêché un pourcentage modéré d'imperfections des soudures. Il eût été vraisemblablement plus élevé en l'absence de mesures préventives.

Citons encore un autre emploi de la fraiseuse. Les soudures fissurées dont nous avons parlé n'ont pas été enlevées, mais rechargées. Après rechargement, on les a examinées à la foreuse pour se rendre compte de l'état des fissures. On a constaté que la fusion du métal les avait fermées à la partie supérieure, mais qu'elles subsistaient à la racine du cordon primitif. Les cordons fissurés étaient en général

été effectués dans les soudures principales. Cinq sondages ont présenté des défauts importants (vides de dimensions appréciables dans le fond des soudures d'angle), 9 ont montré des défauts légers (bulles de petites dimensions). Comme il s'agissait de soudure d'acier 58-65 demi-dur et de soudure résistante, le fraisage des cordons a été assez difficile, la surface étant assez dure. Les reproches que l'on

des cordons courts non continus. On les a allongés de part et d'autre. Des fraisages ont montré que les cordons de prolongement n'étaient pas fissurés.

Une méthode non destructive consiste dans le contrôle par l'utilisation des propriétés magnétiques de l'acier. Il peut servir à déceler les fissures et certains défauts analogues assez voisins de la surface. Le procédé peut être utilisé pour les

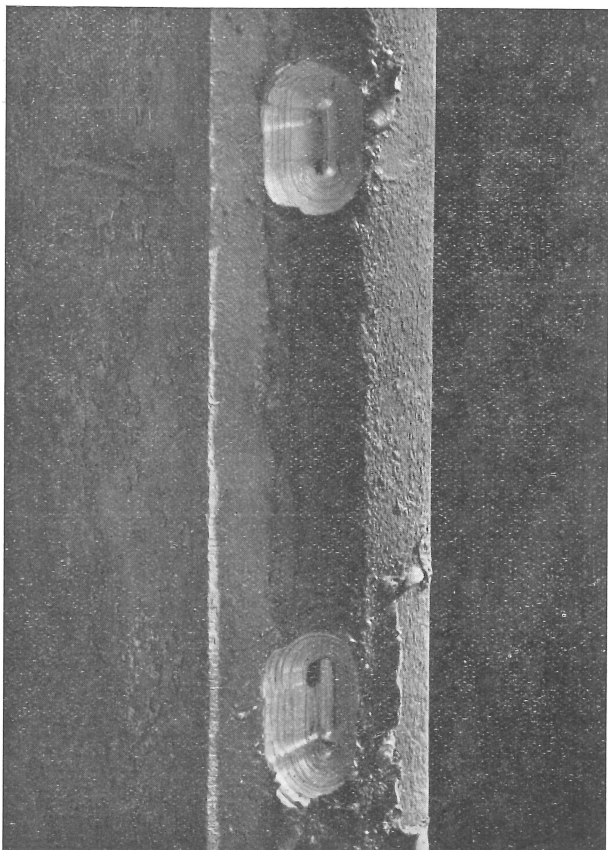


Fig. 15.

éléments de faible épaisseur. Dans les cordons importants, les fissures dues aux tensions de retrait sont souvent visibles à l'œil nu. Ainsi qu'il a été dit plus haut, on en a constaté quelques unes lors de la soudure de la charpente du Génie Civil. Nous ne croyons pas que le contrôle par les appareils électromagnétiques ou par les spectres magnétiques acquière jamais beaucoup d'importance pour la construction des ponts et charpentes. Cependant, nous réserverons un jugement définitif jusqu'à information plus complète; la méthode pourrait être éventuellement utile pour déceler de fines fissures invisibles et des défauts de pénétration voisins de la surface ou affectant des soudures bout à bout peu épaisses.

La radiographie est une autre méthode non destructive. Elle utilise la transparence relative du métal à certaines radiations, notamment le rayonnement gamma du radium et les rayons X. Nous n'entrerons pas plus dans le détail approfondi de

ces méthodes que des autres; nous signalerons notamment les publications récentes et développées de M. F. Guyot (*Annales des Travaux Publics de Belgique*, décembre 1937; *l'Ossature Métallique*, février 1938).

Son organisation pratique pose des problèmes très ardues que nous avons eu à résoudre récemment avec le concours de M. l'ingénieur des Ponts et Chaussées H. Louis. Comme résultat de ce travail, nous espérons que l'Administration sera prochainement pourvue d'un équipement mobile, qui n'enverra rien à ceux de l'étranger. Comme il s'agit encore d'un projet, nous remettons les détails à plus tard. Indiquons cependant qu'il s'agira d'une voiture automobile puissante portant un groupe électrogène Diesel, un poste de soudure, un poste de rayons X, un appareil à fraiser, une chambre noire, du matériel pour l'établissement d'échafaudages et tous les accessoires. Nous avons été conduits pour des raisons diverses, à envisager tout d'abord l'emploi des rayons X, mais la richesse de notre pays en radium nous rend naturellement attentif aux ressources du rayonnement gamma.

Nous ne considérons pas que la radiographie macroscopique soit l'*ultima ratio*. Elle est propre surtout à déceler certains défauts: bulles, pores, soufflures, inclusions, fissures orientées suivant certaines directions. D'autres sont plus difficilement décelables: collages, défauts de pénétration, fissures défavorablement orientées, etc. Enfin, la radiographie macroscopique ne peut déceler les altérations de structure ni les tensions internes dues à la soudure dans le voisinage de celle-ci. Or, nous avons vu que cela peut avoir plus d'importance que des défauts de la soudure. Les méthodes de diffraction permettent, en principe, l'examen de l'altération des structures et des tensions internes⁽⁴⁾. Mais nous n'entrevoions pas encore l'application pratique de ces méthodes aux ponts et charpentes.

Le contrôle s'effectue par radiographie; la radioscopie est inopérante. Le contrôle est coûteux et demande du temps. Il présente tous les inconvénients généraux du contrôle à postériori. En outre, l'interprétation des radiographies est délicate. De telle sorte que si nous considérons le cas extrême d'un ouvrage construit sans aucun contrôle préventif, mais soumis à un contrôle radiographique à postériori tout à fait rigoureux, nous sommes convaincu qu'il correspondrait à la condamnation de la construction soudée, non par justice mais par erreur de méthode. Aucun mode de construction ne trouverait grâce devant une semblable méthode, certes pas non plus la construction rivée.

C'est pourquoi nous avons insisté plus haut sur l'importance technique et économique d'une orientation du contrôle. Voici comment nous concevons finalement un contrôle coordonné en tous points.

(4) D. Rosenthal. — Etat actuel de l'étude des tensions internes dans les métaux par la méthode des rayons X diffractés. Méthode de l'astérisme. Publication n° 4 de 1934 de l'Association belge pour l'étude, l'essai et l'emploi des matériaux.

A la base, nous plaçons toujours une étude adéquate de la construction soudée, réduisant les soudures au minimum et les plaçant aux endroits les plus sûrs. Ensuite, le contrôle préventif s'exercera sur l'acier de base et les électrodes. Les épreuves d'agrégation des soudeurs, la surveillance en cours d'exécution et le contrôle de la qualité des soudures seront combinés et coordonnés.

Les éprouvettes de pliage des examens d'agrégation des soudeurs seront radiographiées avant pliage et devront être parfaites. Cela n'est pas draconien mais très logique, car puisque l'on attend que la radiographie révèle des soudures d'œuvre parfaites, à fortiori doit-il en être ainsi des soudeurs d'examen. Cette pratique augmenterait beaucoup la connaissance des qualités des soudeurs, surtout si les éprouvettes étaient sectionnées ou fraisées pour mettre à nu les défauts internes décelés par la radiographie.

Au point de vue du contrôle de la qualité des soudures, elles seraient divisées en trois classes :

A) Soudures dont la résistance est essentielle pour la sécurité et qui doivent être parfaites (pratiquement).

B) Soudures dont la résistance est importante, mais cependant pas essentielle pour la sécurité, pour lesquelles les tolérances peuvent être plus grandes.

C) Toutes les soudures dont la résistance a peu d'importance.

La répartition des soudures d'un ouvrage entre les trois classes serait faite à l'avance par l'auteur du projet ou l'ingénieur dirigeant, éventuellement après consultation du service de contrôle. Le constructeur en serait informé.

Les meilleurs soudeurs seraient affectés aux soudures A, les autres aux soudures B, les moins bons aux soudures C.

Les soudures A et B seraient radiographiées partiellement et périodiquement au fur et à mesure de l'avancement des travaux. Ce contrôle serait orienté par les observations du registre de soudure et conduit de manière que chaque soudeur y soit soumis, davantage pour les soudures A que pour les soudures B. C'est d'après les résultats de ce contrôle systématique et enregistré que l'on déciderait des examens périodiques de soudeurs agréés, auxquels on renoncerait d'ailleurs pour les soudeurs dont le travail se révélerait constamment parfait à l'examen radiographique. Par contre, si ce même examen révélait fréquemment des défauts graves dans le travail d'un soudeur, celui-ci pourrait être exclu sans nouvel examen préalable. L'ouvrage étant terminé, on compléterait l'examen radiographique de la totalité des soudures A, tandis que les soudures B ne seraient l'objet d'aucune autre vérification, si le résultat des contrôles en cours d'exécution avait été généralement satisfaisant. Les soudures C ne seraient contrôlées que si l'impression était produite que leur qualité laisserait par trop à désirer.

De la sorte, le système de contrôle serait réduit au minimum, tant au point de vue technique qu'au point de vue de la dépense. Il donnerait cependant le maximum de garanties, parce qu'il serait continu

et coordonné. Il exclurait toute surprise et serait ainsi le plus avantageux et le plus équitable pour tous. Toutes les personnes intéressées : dirigeants, contrôleurs, surveillants, exécutants et soudeurs devraient être entièrement informés des résultats de toutes les opérations. Le contrôle serait ainsi également utile et édifiant pour tous. Pour les soudeurs notamment, à l'égard desquels le contrôle n'est pas dépourvu, par ses effets, de certains côtés délicats, la méthode devrait avoir comme conséquence heureuse la formation d'une véritable main-d'œuvre d'élite.

Remarquons que l'examen radiographique met à sa vraie place la méthode destructive et que c'est par une véritable aberration que l'on a affirmé que le premier tuait la seconde. Si le sondage est l'aveugle, la radiographie est le paralytique et les deux se complètent nécessairement. La radiographie permet à la fraise d'agir à bon escient, les forages seront effectués seulement là où la radiographie fait présumer des défauts. Les défauts découverts par la fraise permettront au radiographe de vérifier et d'assurer ses diagnostics. En outre, le fraisage est nécessaire pour la réparation des défauts repérés aux rayons X ou gamma. Ces réparations sont assez délicates et doivent être elles-mêmes radiographiées, éventuellement même à divers stades d'exécution, pour éviter que le remède ne soit pire que le mal, selon la remarque déjà faite.

Un tel contrôle est tout à fait cohérent et soutenu dans toutes ses phases, mais il est dépourvu du caractère draconien et excessif que le contrôle prend volontiers. Aucun contrôle ne peut exister sans la notion de tolérance. Celle-ci doit être précisée par accord entre le service de contrôle et les agents de direction. La décision appartient entièrement à ceux-ci, pour qui le contrôle, répétons-le, ne peut être qu'un conseil et un auxiliaire. Le contrôle continu, coordonné et progressif sera très important pour préciser les tolérances. Nous estimons que l'excellence du contrôle doit résider plus dans son efficacité que dans sa rigueur. Son but doit être de rendre impossible des défauts graves, mais les imperfections non nuisibles doivent être traitées sans sévérité excessive. Le contrôle doit promouvoir la qualité, non la décourager ; il doit être efficient et bienveillant, non formaliste et tracassier. Le contrôle ne prend d'ailleurs pas fin avec l'exécution. Il doit se prolonger avant et après la réception des ouvrages, sous forme de revision périodique, comprenant notamment l'examen des soudures. Cette surveillance de la tenue des constructions en service doit être organisée systématiquement, en vue d'orienter l'entretien et même les constructions nouvelles.

Il nous reste à voir en quelle mesure cet exposé des moyens de vérification, inspiré par nos travaux de 1932-34, sauf en ce qui concerne les moyens non destructifs cités en dernier lieu, demande à être complété en certains points.

L'acier de base fera l'objet d'examens plus attentifs, surtout en cas de dimensions spéciales ou de qualités spéciales. Cependant, même pour des plats

en acier ordinaire et de dimensions usuelles, un essai mécanique de soudabilité a été effectué quelquefois. Il consiste en ceci.

Dans une tôle ou une barre laminée d'épaisseur e on prélève parallèlement au laminage une éprouvette de largeur b et de longueur $l = 2b + 300$ mm. Cette barre est sciée en trois tronçons 1, 2 et 3 de même largeur b . Les tronçons 1 et 3 sont chanfreinés et soudés au tronçon 2 perpendiculairement à son épaisseur (fig. 16). Les faces de l'éprouvette sont

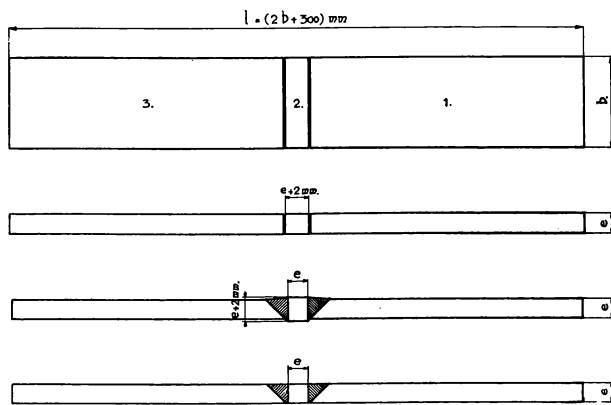


Fig. 16.

ensuite ramenées par rabotage à l'épaisseur e et à la largeur b . Cette éprouvette est soumise à un essai de traction parallèlement au laminage et le résultat est comparé à la résistance à la traction du métal non soudé, dans le même sens. Une éprouvette identique est pliée de telle sorte que le sommet du pli se trouve dans le tronçon 2. Le mandrin utilisé a 30 mm de diamètre, comme pour l'essai de pliage des soudures. On mesure l'angle de pliage lors de la rupture. Sans malfaçon de la soudure, la rupture doit se produire dans le tronçon 2, où la sollicitation est la plus forte. Après rupture, on examinera la structure dans les cassures des diverses éprouvettes.

Pour les plats de grosse épaisseur et les profilés de fortes dimensions, on prélèvera éventuellement des éprouvettes de traction dans le sens de l'épaisseur. On peut essayer actuellement des éprouvettes de traction très courtes (micro-machine de Chevenard, appareil Hounsfield, etc...). Les machines ordinaires Amsler permettent d'essayer des éprouvettes de 35 mm de longueur totale minimum. Cet essai a pour but de déterminer les qualités mécaniques dans le sens transversal, dans le but de parer aux déboires rencontrés quelquefois par suite des feuilletages et doublages.

Pour les aciers spéciaux, beaucoup d'ingénieurs ont insisté ces derniers temps sur des analyses du métal, des essais métallographiques et des déterminations exactes de la limite élastique, enfin des essais métallographiques et mécaniques de soudabilité. Ces conditions ne diffèrent guère de celles que nous avons considérées anciennement. Rappelons toutefois notre suggestion relative à l'essai de résilience appliqué à la soudabilité.

Les essais de réception des électrodes n'ont guère

changé. L'Administration des Ponts et Chaussées a supprimé l'essai de pliage, mais y a substitué un essai de dureté Brinell sur une éprouvette plate constituée comme celle de pliage. On sait que le billage et notamment le microbillage sont des moyens d'investigation intéressants des soudures. Les éprouvettes doivent, notamment pour l'essai Rockwell, avoir une surface parfaitement unie. La mesure des largeurs d'empreinte est d'ailleurs plus sûre que celle des profondeurs.

Pour l'agrément des soudeurs, on conserve généralement l'éprouvette de pliage sur acier doux. L'éprouvette en croix pour le pliage n'a pas été adoptée. Le règlement allemand de 1934 prescrit pour la vérification de l'aptitude des soudeurs pendant l'exécution un essai de pénétration sur éprouvette en T à soudure d'angle unique. Le règlement belge de 1935 prévoit un essai analogue pour apprécier l'aptitude du procédé de soudure pour l'assemblage en position difficile. Le rapporteur, M. H. Dustin (*op. cit.*) reconnaît le caractère très subjectif de cet essai, que nous n'estimons guère intéressant et auquel nous préférons les éprouvettes en croix, moins artificielles, plus certaines et plus objectives.

Des essais de traction sur éprouvettes assemblées par cordons d'angle latéraux et frontaux, envisagés il y a quelques années, n'ont pas été conservés, les soudures bout à bout ayant évincé les autres pour les assemblages importants. (Un semblable essai figurait dans le règlement allemand de 1931, il a été supprimé dans l'édition revue de 1934).

Des essais de fatigue sur éprouvettes assemblées de manières diverses ne sont généralement pas prévus dans les moyens de contrôle et n'entrent pas dans cette catégorie. Ils peuvent convenir pour des études préalables en vue du choix de l'acier et des électrodes, pour des ouvrages soumis à des effets dynamiques importants. Citons dans cet ordre d'idées les essais de traction répétée, de choc répété par flexion ou traction et aussi, au point de vue de la fragilité, l'essai de rupture par choc à la traction. Enfin, n'oublions pas l'intérêt de l'étude de la corrosion des soudures et aussi celle du retrait. Il n'est pas interdit de penser qu'un essai de retrait soit introduit quelque jour concernant la qualification des soudeurs. Il n'en existe pas actuellement à notre connaissance. Précisons aussi que tout ce qui précède se rapporte implicitement aux constructions soudées à l'arc électrique, parce que ce sont les seules dont nous ayons eu l'occasion de nous occuper. Nous estimons que pour les constructions soudées par d'autres moyens, notamment aux gaz, la conception générale et le fond des moyens pratiques restent les mêmes.

Enfin, terminons en exprimant l'opinion que le contrôle des constructions soudées, constitue un terrain de rencontre de la construction, de la métallurgie et de l'industrie spéciale de la soudure. Il peut et doit favoriser une collaboration loyale et confiante des représentants de ces diverses branches de l'industrie, dans lesquelles j'inclus les grandes administrations techniques. Le progrès est à ce prix et doit être recherché dans l'intérêt national. La

Belgique a, en effet, déployé beaucoup d'initiative en matière de constructions soudées. Le succès n'a pu être obtenu que par la collaboration, qui doit non seulement être maintenue, mais amplifiée, maintenant qu'elle est placée dans notre pays sous le signe de l'union de la science et de l'industrie.

Citons à l'appui de ce vœu l'opinion d'un illustre métallurgiste, Henry Le Chatelier ⁽⁵⁾ : « Rappelons tout d'abord l'importance des cahiers des charges ; indiquons leur rôle capital pour stimuler suivant les cas ou au contraire paralyser complètement une industrie. Par leurs conditions de réception, l'artille-

⁽⁵⁾ Préface pour une brochure de M. Charpy : Conditions et essais de réception des métaux. 1917, Dunod et Pinat, Paris.

Voir aussi : Les cahiers des charges pour la réception des dépôts électrolytiques, par M. Ballay. *Aciers spéciaux et alliages*, n° 86, 1933.

rie et la marine ont exercé une action féconde sur le développement de notre métallurgie et nous ont donné tous les aciers utilisés jusqu'ici dans les constructions civiles. L'acier Bessemer et surtout l'acier Martin, perfectionnés en vue de la fabrication des canons, servent maintenant à faire des tôles, des rails, des poutrelles. De même, les aciers nickel-chrome pour projectiles et plaques de blindage ont passé dans la construction automobile. Les exigences si minutieuses des artilleurs ont été un aiguillon très profitable pour les industriels, les poussant vers l'amélioration de la qualité et le perfectionnement des méthodes de travail. Par contre, les cahiers des charges des architectes de la Ville de Paris ont tué l'industrie des chaux hydrauliques dans un rayon de 200 km autour de la capitale. »

On ne pourrait avec plus d'autorité prouver la nécessité de donner aux cahiers des charges et au contrôle un caractère scientifique et progressif.
