

UNIVERSITE DE LIEGE

COURS DE CONSTRUCTIONS DU GENIE CIVIL

N° 85

Réflexions sur les ponts soudés

par F. CAMPUS,

Professeur ordinaire à l'Université de Liège.

Extrait de la Revue de la Soudure, n° 1, 1954.

Imprimerie Robert LOUIS
rue Borrens, 37-39
Ixelles — Bruxelles

1954

Réflexions sur les ponts soudés

par F. CAMPUS,

Professeur ordinaire à l'Université de Liège.

Lorsque M. P. GOLDSCHMIDT, directeur de l'Institut belge de la soudure, m'a demandé, le 30 avril dernier, lors de l'ouverture des Journées de la Soudure organisées par la Section de Liège de l'A. I. Lg. à l'occasion de la Foire internationale de Liège, de faire à cette tribune une conférence sur les ponts soudés, j'ai accepté sans doute avec quelque légèreté. Je ne connaissais pas alors la communication très documentée et autorisée de mon excellent collègue et ami M. H. LOUIS à ces mêmes journées, sur la conception, l'exécution et le contrôle des constructions soudées, dans laquelle les ponts tiennent une large place ⁽¹⁾. Je n'ai pas l'intention d'ajouter quoi que ce soit aux sujets dont il a traité.

Depuis lors, j'ai pris connaissance du texte, paru en septembre 1953, de la communication faite à Paris le 18 mars 1952 par M. A. DUNOYER ⁽²⁾ sur la soudure dans la construction métallique, sous les auspices de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics, ainsi que de l'Association française des ponts et charpentes. Elle a trait principalement aux ponts soudés et elle contient assez bien d'indications sur le pont Duplessis ou de Trois-Rivières, près de Québec, qui s'est rompu dans la nuit du 30 janvier 1951. M. A. DUNOYER avait déjà commenté cet accident au 4^e Congrès international des Ponts et Charpentes, à Cambridge, en 1952 ⁽³⁾.

Le texte de la communication du 18 mars 1952 de M. A. DUNOYER ⁽²⁾ est accompagné de remarques du plus haut intérêt, présentées lors de la discussion par des personnalités éminentes : M. A. CAQUOT et M. L. CAMBOURNAC. La lecture de cette publication m'a convaincu que l'attention est toujours concentrée sur les questions fondamentales que j'ai étudiées, exposées et publiées il y a plusieurs années ⁽⁴⁾ ⁽⁵⁾ et sur lesquelles je suis encore revenu au Building Research Congress à Londres, en septembre 1951, où l'on m'avait fait l'honneur de m'inviter à exposer l'état de la recherche sur les constructions soudées ⁽⁶⁾. Bien que ce congrès s'intéressât aux bâtiments plutôt qu'aux ponts, les points de vue sont globalement les mêmes, avec toutefois un superlatif en ce qui concerne les ponts, car les difficultés y sont les plus grandes et l'on n'a pas eu à déplorer d'accidents d'ossatures soudées de bâtiments.

Toutes ces circonstances m'ont incité à répondre à l'invitation de M. P. GOLDSCHMIDT en venant vous exposer des réflexions personnelles sur les ponts soudés, réflexions qui sont encore utiles. Car si, en matière de ponts soudés dans notre pays, à l'instar d'un chef de gouvernement, on a agi d'abord, on a eu bien lieu de réfléchir ensuite et je ne suis pas convaincu que l'on ait depuis réfléchi assez et que l'on ait bien réfléchi. Ce dont j'ai des preuves, par contre, c'est que l'on n'a pas assez réfléchi avant.

Ces réflexions, vous vous en doutez bien, pourraient comporter beaucoup de reminiscences, depuis bientôt un quart de siècle que j'ai commencé à m'occuper de constructions soudées. Je suis las, en réalité, d'avoir répété si souvent les mêmes choses et cependant, il faut bien y revenir sans cesse à cause de leur caractère fondamental. Je me bornerai aux seules réminiscences que je jugerai utiles. Puisque je ne referai pas l'exposé de M. H. LOUIS (1), je me tiendrai plutôt en dehors des questions techniques proprement dites, en tous cas des questions de détails, non qu'elles soient négligeables mais au contraire d'importance considérable : rien n'est négligeable en construction et principalement en construction soudée. Mais je donnerai à mes réflexions, qui ont déjà assez de recul, un caractère plus général, plus philosophique si l'on veut bien me pardonner cette expression, ou encore plus humain. En fin de compte, pour les ponts soudés comme en toutes choses, les éléments décisifs sont sur le plan humain, mais nous gardons trop souvent d'en parler, par une hypocrisie dont nous ne craignons pas de nous flatter comme d'une qualité. Sur ce point, nous avons certes beaucoup à gagner d'acquérir un sens plus direct des « human relations » à l'instar des Américains du Nord.

Un pont soudé est, comme tous les ponts, un ouvrage d'art. C'est, en outre, un chef d'œuvre de la construction soudée. Voici ce que j'entends par là.

Un grand bateau soudé est certes une réalisation magnifique de la technique, mais ce n'est pas vraiment un ouvrage d'art ; il n'est pas (ou il est rarement) signé. Ses plans sont anonymes ; ils sont contrôlés par de puissantes organisations, de même que son exécution et son entretien, ceci en vue de l'assurance maritime. En cas d'accident, si l'on met des personnes en cause, elles appartiennent à l'état-major du bateau, non au chantier naval. Il n'y a d'ailleurs pas de raison impérative qui empêche que de très nombreux bateaux, des catégories de bateaux, soient faits suivant les mêmes plans, reproduits à de très nombreux exemplaires. Cela devient alors une fabrication, plus ou moins éprouvée, perfectionnée et facilitée par l'expérience qu'apporte la répétition, comportant des éléments de plus en plus nombreux fabriqués en série, préfabriqués comme on dit. La fabrication est faite entièrement dans des chantiers spécialisés et est dominée par une routine. Loin de moi la pensée que la construction navale ne pose pas de problèmes compliqués et difficiles de soudure, mais ce sont des problèmes de chantier, qui ne sont pas uniques ou tout-à-fait isolés, mais plutôt courants et qui

s'appliquent, avant montage, à des éléments dont les dimensions permettraient souvent, s'il y avait lieu, des traitements appropriés. Les épaisseurs à souder sont généralement assez modérées et les opérations de soudure peuvent être, en général, très organisées et contrôlées. Cela n'a pas empêché qu'il se soit produit des accidents graves à des bateaux soudés. J'ai eu personnellement l'occasion de voir en mer un demi-bateau soudé rompu resté à flot et remorqué ; c'est une impression singulière et inoubliable. Mais il est permis de croire que les conditions de construction de beaucoup de bateaux soudés en Amérique, en pleine guerre, ont été aussi singulières et que l'on doit y rechercher la cause de ruptures et d'accidents qu'il semble que l'on ait appris à surmonter.

Je ne songe pas davantage à nier que les grandes conduites forcées soudées et les réservoirs de fluides sous forte pression soudés soient des prouesses techniques. Mais ce ne sont pas non plus des ouvrages d'art, mais bien des travaux industriels, sinon anonymes, du moins collectifs. Ils comportent aussi en général des éléments reproduits à de nombreux exemplaires. Les dimensions de tous les éléments permettent en général des traitements spéciaux. Bref, il s'agit encore d'une fabrication en quelque sorte régulière et qui peut aussi être devenue une routine chez les firmes spécialisées. Certes, dans ce domaine aussi, des accidents tragiques se sont produits, généralement aux pièces spéciales. Actuellement, ces pièces peuvent faire l'objet de traitements de recuit ; leur étude préalable peut se faire sur modèles à échelle réduite. M. H. LOUIS a très judicieusement attiré l'attention sur de tels problèmes (2), qui tendent à devenir assez classiques.

Dans ces deux cas d'application de la soudure, qui sont très importants et qui ont connu des accidents retentissants, l'analogie avec les ponts s'arrête là. Les bateaux, les réservoirs et les conduites font en effet l'objet de fabrications entièrement manufacturées et, en quelque sorte courantes. Je ne sous-estime pas les difficultés qu'il a fallu surmonter pour passer de la rivure à la soudure, mais elles sont les mêmes pour les ponts et elles sont d'ordre industriel.

Sans doute les ponts sont-ils aussi construits dans des usines spécialisées, mais pas tellement que l'on n'y construise que des ponts, car on y construit généralement aussi d'autres choses, puisque l'on n'exécute pas constamment des ponts. Ensuite, une partie importante de l'ouvrage s'exécute en dehors de l'atelier, sur le chantier, à l'extérieur. Il est assez rare que l'on construise plusieurs ponts identiques, et alors pas même toujours

dans le même atelier. La réalisation en assez grande série, même des éléments, est peu fréquente. La routine est donc moins établie. Et surtout, chaque pont répond généralement à une destination propre et particulière. Il doit donc faire l'objet d'une étude propre et particulière d'un auteur de projet, qui signe ses plans et qui, le plus souvent, est étranger à l'atelier de construction.

Ceci entraîne naturellement une très grande variété et aussi, peut-être ou même probablement, une certaine méconnaissance des difficultés d'exécution. Ainsi il arrive généralement que la soudure des ponts présente, en raison des dimensions et des formes, des difficultés supérieures à celles que l'on rencontre dans les autres constructions soudées et auxquelles on ne peut appliquer certains traitements d'atelier. C'est pour cela qu'à mon sens, les ouvrages d'art que sont les ponts soudés sont en même temps des chefs d'œuvre de la construction soudée.

Les conséquences de ces caractères sont claires à mes yeux : l'exécution d'ouvrages d'art et de chefs d'œuvre requiert des qualités personnelles adéquates de connaissance, d'expérience et d'habileté, mais aussi de capacité générale. Ces qualités sont nécessaires à tous les stades. A celui de la conception et de l'étude pour l'auteur du projet, les calculateurs et les dessinateurs. A celui de l'exécution, pour les directeurs, les ingénieurs, les chefs d'ateliers, les contremaîtres et les ouvriers. A celui du contrôle enfin, pour les ingénieurs, les réceptionnaires, les inspecteurs et les surveillants.

Partout, il faut les qualités les plus éminentes, individuellement et en commun, car l'esprit de collaboration à l'œuvre commune doit être lui aussi très élevé. Au cours d'une conversation, il y a quelques mois, M. J. VELITCHKOVITCH, l'un des auteurs du Pont Corneille à Rouen, m'indiquait que les constructeurs de l'ouvrage avaient été désignés à la suite d'une adjudication restreinte entre un petit nombre d'ateliers assez spécialisés en construction soudée et de ce fait jugés dignes de confiance pour l'exécution d'un tel ouvrage. Et l'on doit effectivement admirer l'unité et la perfection d'organisation et de coordination qui ont présidé à l'ensemble de la construction de cet ouvrage en tous ses points, réalisant une adaptation parfaite de la conception, de la fabrication en usine et du montage.

La réunion de ces conditions personnelles n'est pas impossible, mais elle doit être évidemment assurée par une volonté agissante. Elle ne se réalise pas si elle est laissée au hasard et ceci peut être suivi des conséquences fâcheuses que l'on a connues. Si les conditions requises

ne sont pas réalisées, il faut éviter de prendre des risques et éventuellement renoncer à la soudure.

Je me permettrai ici d'évoquer quelques réminiscences, uniquement en raison de leur caractère exemplatif en rapport avec les considérations précédentes. Elles sont toutes appuyées de références bibliographiques contemporaines.

En 1930, le cahier des charges pour l'adjudication de la charpente rivée de l'Institut de Chimie-Métallurgie au Val-Benoît autorisait la présentation de contre-projets soudés. J'ai indiqué ailleurs ⁽⁷⁾ ⁽⁸⁾ ⁽⁹⁾ qu'un seul soumissionnaire usa de cette latitude : son projet comportait une forte augmentation de poids et son offre était la plus chère. Cette expérience apportait la preuve que le personnel pour la conception d'ouvrages soudés évolués n'existait pas dans le secteur privé, pas plus que je n'aurais osé entreprendre alors un tel projet.

En mai 1932, après une étude très attentive, une charpente métallique continue entièrement soudée fut adjudgée pour l'Institut du Génie Civil. La société adjudicataire proposa l'emploi d'acier spécial 58/65, ce qui fut admis au prix d'un remaniement du projet. Cette étude d'une importante construction soudée, qui était la première pour ses auteurs, fut faite avec beaucoup de prudence et de soins jusque dans les moindres détails. La société constructrice disposait d'un excellent personnel de maîtrise et de soudeurs et son intervention particulière dans l'ouvrage, par la modification de la qualité de l'acier, était importante. Ainsi la réunion des conditions optima précédemment définie se trouva-t-elle heureusement réalisée pour ce premier ouvrage soudé, dont les états de service sont honorables ⁽⁹⁾.

On m'objectera que c'était par l'effet du hasard. Mais il ne faut pas l'incriminer lorsqu'il est favorable ; il convient seulement de se garder des hasards malencontreux. Je citerai comme exemple celui de la charpente du Laboratoire de Thermodynamique de l'Université de Liège au Val-Benoît, mise en adjudication en 1933 selon un projet de portiques continus entièrement soudés en acier à haute résistance, établi d'après l'expérience de la charpente précitée de l'Institut du Génie Civil. Le plus bas soumissionnaire désigné comme adjudicataire n'offrait pas de garanties suffisantes pour la soudure. L'application stricte des conditions techniques du cahier des charges ne permit pas l'agrégation des soudeurs et le constructeur demanda spontanément à être autorisé de substituer la rivure à la soudure, en proposant un rabais de prix de 5 %. Cette proposition fut acceptée et la charpente ne fut pas soudée ⁽¹⁰⁾ ⁽¹¹⁾ ⁽¹²⁾ ⁽¹⁷⁾. J'imagine qu'une solution du même genre

eut été raisonnable et propice pour quelques ponts soudés.

Il faut en effet que j'y revienne, car on me reprochera d'avoir dérivé vers les charpentes soudées. Mais cette diversion n'est qu'apparente et pas sans rapport avec mon objet. En effet, ce fut un de mes assistants, collaborateur de l'étude de la charpente métallique rivée de l'Institut de Chimie-Métallurgie, ayant pris part à la direction de son exécution et ayant participé aux études préliminaires du projet de charpente soudée de l'Institut du Génie Civil qui, passé au service de la Société qui avait construit la charpente de l'Institut de Chimie-Métallurgie, joua un rôle déterminant dans l'essor des ponts soudés en Belgique. Il compléta dans le chef de cette société la conjonction favorable définie plus haut : une direction animée d'un esprit entreprenant, un auteur de projet averti, un atelier équipé pour la soudure, des soudeurs de qualité et convenablement surveillés. Et, circonstance éminemment favorable, cette conjonction se trouvait établie au sein d'une institution unique, d'ailleurs industrielle, c'est-à-dire particulièrement souple, mais où la définition et l'étendue des responsabilités étaient aussi particulièrement claires.

Le résultat en fut tout d'abord la présentation par cette Société d'un contre-projet de pont soudé à l'atelier et rivé au montage lors de l'adjudication en automne 1930 du pont de Lanaye sur le Canal Albert ⁽¹¹⁾ ⁽¹³⁾ ⁽¹⁴⁾. Préalablement à l'adoption de ce projet, l'Administration des Ponts et Chaussées exigea un essai sur modèle de nœud rivé et soudé, auquel je procédai en 1931 dans les ateliers de la Société en question ⁽¹⁵⁾ ⁽¹⁶⁾ ⁽¹⁷⁾. La même société triompha la même année lors de l'adjudication-concours du pont tournant du Muide à Gand, en présentant un projet de pont Vierendeel soudé en atelier et rivé au montage inspiré de celui de Lanaye ⁽¹¹⁾ ⁽¹³⁾ ⁽¹⁸⁾. Les mêmes ateliers présentèrent en 1933 des contre-projets entièrement soudés pour l'adjudication des ponts « A » et « C » d'Herenthals sur le Canal Albert ⁽¹¹⁾ ⁽¹³⁾ ⁽¹⁹⁾. Ainsi la technique des ponts soudés était créée en Belgique, à la faveur des circonstances favorables exposées ci-dessus. Ces premiers ouvrages, réalisés dans ces conditions, se sont comportés sans reproches.

Je crois utile maintenant de reproduire un extrait de la communication de M. DUNOYER ⁽²⁾.

« ... je voudrais vous raconter l'histoire des cinquante deux ponts. Vous en tirerez les conclusions suivant vos tempéraments.

L'adjudication préparée par l'Administration pour ces ponts du Canal Albert avait prévu une construction Vierendeel *rivée*, ce type d'ouvrage bien connu et exécuté en Belgique ayant toujours donné satisfaction.

Une des firmes interrogées et que je connais bien, spécialisée dans la soudure, proposa une variante en *construction soudée*, qui s'avéra être beaucoup plus économique. L'Administration naturellement et judicieusement intéressée par cette économie, étudia elle-même un type de pont soudé, en s'inspirant du projet présenté, sans toutefois en faire une copie exacte, et prit d'ailleurs quelques initiatives, qu'elle pensait heureuses dans les formes constructives. L'adjudication fut reprise sur cette nouvelle étude et les ponts répartis entre une douzaine de constructeurs belges : la firme initiale obtenait un lot de dix ponts, tout en conservant la forme primitive de son projet original. L'exécution fut réalisée par toutes les firmes, avec le même métal (acier doux Thomas 42/50 — A % = 20 à 24 %). Sur les cinquante deux ponts exécutés, nous avons vu qu'une dizaine avait été mis hors service avant mai 1940. La firme initiale avait pour sa part exécuté une dizaine de ponts sur lesquels *aucun désordre* n'a été observé et qui étaient encore en service à cette date ; il y en eut quarante deux exécutés suivant les plans de l'Administration, dont dix étaient hors de service à cette époque, d'où un déchet d'un quart. Ce qui prouve que la technique ne s'invente pas et que, dans certains cas, le métal même n'est pas en cause ».

Ainsi écrit M. DUNOYER, dont l'autorité et les accointances avec la Belgique sont connues.

Son exposé, évidemment très succinct, appelle beaucoup de réserves et de rectifications. Il a surtout l'inconvénient de constituer comme une sorte de projection sur un plan, complètement privée de la perspective du temps. C'est pourquoi j'ai cru devoir, dans les lignes qui précèdent, compléter cet exposé par l'historique des débuts, qui m'est exactement connu et que j'appuie de références. Mais ma connaissance s'arrête en 1933, à partir du moment où : « Au début de 1934, l'Administration des Ponts et Chaussées mettait en adjudication huit ponts complètement soudés sur plans établis par le Bureau Central des Ouvrages d'Art à Bruxelles » ⁽¹³⁾. Ce n'est qu'en 1936 que je fus informé officiellement que certaines difficultés avaient été rencontrées, que certains désordres s'étaient produits et que, par une convention conclue à l'initiative d'un consortium de constructeurs de ponts et de l'Administration des Ponts et

Chaussées, mes laboratoires étaient chargés de certaines enquêtes et études en vue de l'amélioration de certaines constructions soudées (4). Puis survinrent les graves accidents évoqués par M. DUNOYER et ce qui suivit, dont je n'ai pas l'intention d'acter ici systématiquement l'histoire ; je me bornerai éventuellement à relever l'un ou l'autre point en temps utile.

En raison du « trou » de mes connaissances historiques, de 1933 à 1936, je ne puis apprécier les raisons qui incitèrent l'Administration des Ponts et Chaussées à mettre en adjudication publique des ponts entièrement soudés dont les projets étaient dressés par ses services. Je me bornerai à constater que cette mesure rompait entièrement la conjonction favorable qui avait présidé à l'essor des premiers ponts soudés dans le pays.

L'Administration des Ponts et Chaussées n'était pas à cette époque préparée à faire les études de ponts soudés parce qu'elle ne possédait pas le personnel adéquat à cet effet. Il est unanimement admis, je pense, qu'il en résulta des erreurs de conception (1).

L'Administration était en outre totalement dépourvue de personnel de contrôle et de surveillance compétent. Ce n'est qu'au mois d'août 1937 que l'Administration des Ponts et Chaussées s'approcha en vue de la constitution d'un service spécial de contrôle (20). Ce dernier entra en fonctions en octobre 1937, constitué du seul ingénieur M. H. LOUIS que je m'étais adjoint pour l'enquête et les études dont j'avais été chargé en 1936, ainsi que je l'ai dit plus haut. [Voir aussi (4)]. Le destin des ponts soudés belges était alors déjà fixé. Enfin, l'exécution était livrée aux hasards de l'adjudication publique, sans garanties de qualification des soumissionnaires pour la soudure. Il est permis de penser que se renouvela la situation que j'ai mentionnée plus haut à propos de la charpente du Laboratoire de Thermodynamique, pour laquelle l'adjudicataire me déclara sans ambages qu'il avait fait les rabais nécessaires pour emporter le marché, afin d'avoir l'occasion d'apprendre à souder. Il est unanimement admis, je pense, qu'il y eût des défauts d'exécution et que la surveillance fut insuffisante.

Ces remarques, qui ne contredisent pas foncièrement l'historique sommaire de M. A. DUNOYER, mais qui le précisent singulièrement en certains points, sont évoquées uniquement à l'appui de mes réflexions sur les conditions requises pour entreprendre avec chances de succès la construction de ponts soudés.

Naturellement, il y a aussi les questions techniques, mais celles-ci relèvent précisément de la compétence nécessaire des ingénieurs, des constructeurs et des con-

trôleurs. Je passerai successivement en revue les principales, mais sans aller aux détails.

J'envisagerai tout d'abord la qualité de l'acier, non que je croie que ce soit la plus importante, mais parce qu'elle se présente tout de même en premier lieu à l'auteur du sujet. Les idées se sont heureusement beaucoup dépêtrées des brouillards ou des nuages de fumée qui se sont dégagés des premiers accidents. Elles se sont assez clarifiées pour conduire aux conclusions des deux congrès de l'Association internationale des Ponts et Charpentes, de Liège en 1948 et de Cambridge en 1952 (21) (22). Il n'est plus question de l'acier à ce point soudable qu'il permette sans risque toutes les fautes de conception et d'exécution (23). Je répète, une fois de plus, que je suis partisan des meilleurs aciers possibles, mais que c'est là une opinion trop platonique et qui doit compter avec les réalités. Ces réalités sont que l'acier est un produit industriel et qu'il faut tenir compte des facteurs économiques. Il faut bien remarquer que la métallurgie de l'acier est difficile ; c'est un alliage assez compliqué. Il n'est pas question à son sujet, comme dans certaines autres métallurgies, de produire un métal pur à près de 100 %, comme pour l'aluminium, le cuivre, etc. Le constructeur ne peut pas demander l'impossible au sidérurgiste ; il ne l'obtiendra d'ailleurs pas, mais il paiera cher. Il n'est pas possible d'explorer chaque cm² d'une fourniture de centaines ou de milliers de tonnes d'acier par des moyens non destructifs et, l'eût-on fait, que l'on ne pourrait encore garantir que la fourniture soit sans défauts.

Les conditions à imposer pour la réception des aciers dits soudables doivent être raisonnables, de manière à permettre des fournitures qui restent dans les limites économiques tout en garantissant les constructeurs contre les défauts avérés de l'acier, dans une mesure égale à celle qui est réalisée dans les autres modes de construction. On s'est ingénié dans les dernières années à imaginer des essais d'une complication de sollicitation raffinée qui sont généralement sans rapport avec l'usage de l'acier. Ce sont peut-être des indices de qualité, mais on saisit mal leur rapport avec les constructions soudées. Il faut craindre que, d'une manière larvée, ils entretiennent la notion de l'acier qui permette sans danger les fautes de conception ou d'exécution. Dans ce sens, ils peuvent être dangereux.

M. A. CAQUOT, dans ses remarques sur la communication de M. DUNOYER (2) souligne à juste titre l'importance de l'essai de choc sur barreau entaillé, c'est-à-dire sur la nécessité d'aciers résilients. Je suis pleinement d'accord avec mon éminent collègue et mieux

qu'en opinion, c'est-à-dire en fait. En 1932, l'essai de choc sur barreau entaillé a été imposé pour l'acier 58-65 de la charpente continue soudée de l'Institut du Génie Civil, d'accord avec le constructeur, qui était d'ailleurs le producteur de l'acier ⁽⁸⁾ ⁽⁹⁾. En ce qui concerne les ponts soudés belges, les premiers, qui étaient des contre-projets, étaient régis par des cahiers des charges établis par l'Administration pour des ponts rivés, c'est-à-dire que les spécifications des aciers étaient celles en usage normal pour l'acier 42-50 et ne comportaient pas l'essai de choc sur barreau entaillé. J'ignore si l'atelier de construction responsable du contre-projet a cru devoir augmenter les garanties de qualité de l'acier, mais j'en doute, les conditions de soudure étant peu sévères. Pour les ponts soudés dont les plans ont été établis par l'administration, les conditions de qualité des aciers sont restées celles en usage pour les ponts rivés évoquées ci-dessus, en dépit de conditions de soudure très graves. La résilience des aciers n'était donc pas garantie.

Des essais de choc sur barreaux entaillés ont été effectués en grand nombre sur les aciers du pont de Hasselt après l'accident, parmi quantité d'autres essais. Ceux du Professeur ROS, du L. F. E. M. de Zürich, et de M. MUND, ingénieur en chef des chemins de fer néerlandais, ont été exécutés sur des échantillons d'acier que je leur ai fait parvenir avec l'accord de l'Administration. Il est regrettable que leurs résultats n'aient, pas plus que les miens, été publiés.

Les seules publications sur des résultats d'essais d'aciers du pont de Hasselt ont été faites en Angleterre ⁽²⁴⁾ et en Allemagne ⁽²⁵⁾ ⁽²⁶⁾, dans des conditions sur lesquelles je ne reviendrai pas. J'ai commenté anciennement les résultats de ces essais, en relation avec ceux des chercheurs précités et des miens, non publiés ⁽²⁷⁾. Les essais de choc sur barreaux entaillés ont été faits en grand nombre et dans des conditions très variées : au naturel, loin et près des soudures, après écrouissage, après vieillissement, après trempe, après recuit, après surchauffe, à basse température, etc. Des éprouvettes de toutes formes et dimensions ont été utilisées. Il en résulte une certaine confusion, une grande dispersion et une difficulté de comparaison. Si l'on peut en déduire une conclusion générale, je crois ne pouvoir mieux faire que de l'emprunter au rapport anglais ⁽²⁴⁾ ⁽²⁷⁾, qui s'exprime comme suit : « En ce qui regarde la qualité de l'acier, l'évidence résultant du petit nombre de spécimens examinés tend à prouver que si l'acier employé était insatisfaisant à certains égards, tout le blâme pour l'effondrement du pont ne peut avec quelque justifica-

tion être placé sur l'acier seul ». Les valeurs des résiliences au naturel, à l'état de livraison, étaient plutôt satisfaisantes, mais si l'essai de choc sur barreau entaillé avait été imposé, il est probable que l'acier eût été mieux élaboré, plus soigné et plus régulier. Il est apparu notamment des analyses chimiques que les teneurs en S et en P, sans être excessives, étaient cependant assez élevées et, en ce qui concerne le P, assez irrégulières. Les pattes d'attache des goussets, en acier coulé, eussent certes été refusées; mais elles auraient d'ailleurs dû l'être même sans essai de choc sur barreau entaillé.

Je crois donc que la résilience est une condition nécessaire, mais mon opinion est qu'elle n'aurait pas été suffisante dans le cas du pont de Hasselt. Deux hommes au moins partageaient cette opinion avec moi et me l'ont communiquée : KOMMERELL et SCHAPER. Sur ce point, je ne puis mieux faire que reproduire la citation que j'ai faite déjà dans ma communication aux Journées de la Soudure à Liège au printemps dernier ⁽²⁸⁾, empruntée au Professeur Ed. AMSTUTZ, Président de la Direction du Laboratoire fédéral d'essais des matériaux de Zürich ⁽²⁹⁾: « C'est aller trop loin que de supposer qu'un joint soudé qui, essayé avec une entaille très aiguë, à la température la plus basse à laquelle puisse être exposée la construction dont elle fait partie, ne dénote pas de perte de résilience, puisse sans inconvénients présenter des pores et des fissures aiguës de retrait ; que le matériau arrêtera toujours les fissures qui peuvent en résulter et que, par conséquent, tout contrôle aux rayons X, aux ultrasons et par voie magnétique soit superflu. On ne peut assez mettre en garde contre de telles conceptions. Ce serait un pas difficile à franchir que de réduire les exigences concernant l'exécution des soudures, parce que des essais de choc sur barreau entaillé établiraient de bonnes résiliences aux basses températures.

L'essai de choc sur barreau entaillé sous toutes ses formes ne peut donner plus que ce qui correspond à sa nature... ».

Je voudrais attirer encore l'attention sur une remarque de M. DUNOYER ⁽²⁾ relative à l'intérêt de la striction. Elle rejoint des suggestions que j'ai faites anciennement ⁽⁴⁾ ⁽⁵⁾ sur l'opportunité de tirer un parti plus complet de l'essai de traction, qui reste bien entendu fondamental et indispensable. Il faudrait déterminer, outre l'allongement moyen de rupture (en dehors de la zone strictionnée), l'allongement local maximum correspondant à la striction, la résistance vive

ou énergie de rupture totale, l'énergie de rupture réparée et l'énergie de striction, enfin l'allure et les limites ou la longueur du palier d'étirage, qui ont une grande importance. Les variations de ces facteurs en fonction de divers traitements mécaniques ou thermiques et de la température d'essai peuvent être caractéristiques des qualités d'un acier.

Une dernière remarque sur ce point concerne l'opportunité de l'emploi d'aciers de nuances différentes dans les constructions soudées d'après l'importance des concentrations de soudure. Par exemple, en 1932, l'acier à haute résistance 58-65, proposé par le constructeur pour la charpente de l'Institut du Génie Civil et reconnu soudable, a été admis pour la presque totalité de la charpente sauf pour les goussets et les embases, pour lesquels on a conservé l'acier 42-50 prévu au cahier des charges (9). Par contre, l'emploi des pattes d'attaches en acier coulé des goussets de certains ponts soudés belges, notamment du pont de Hasselt, étaient contre-indiqué.

Si je tourne ensuite mon attention pendant quelques instants vers les ruptures fragiles ou sans striction, certains croiront que je ne quitte pas les sujets de l'acier et de sa soudabilité, puisqu'aussi bien une forte tendance existe à identifier la notion assez qualitative et imprécise de soudabilité avec une notion encore moins précise de tendance spécifique à la rupture fragile ou inverse, c'est-à-dire d'inhibition spécifique des ruptures fragiles. J'ai consacré assez bien de temps à cette question lors de mes leçons de Chaire Francqui à l'Université libre de Bruxelles au printemps de 1951, trop de temps pour que je puisse y revenir ici avec le même développement. Je me bornerai à rappeler que j'avais relevé et commenté douze causes qui favorisent les ruptures fragiles et dont certaines sont contradictoires. Je n'ai pas considéré l'énumération de ces causes comme exhaustive. A titre de simple exemple, je ferai remarquer que l'on s'est fortement engagé au cours des dernières années dans la voie d'essais sur des pièces entaillées à basse température, afin de déceler ce que l'on appelle la température de transition, c'est-à-dire de passage des ruptures ductiles aux ruptures fragiles. Or, les aciers donnent aussi de remarquables ruptures fragiles aux températures élevées sous charge permanente, c'est-à-dire après une certaine durée d'application de la charge, en absence de toute entaille.

Mon opinion, anciennement connue (4) (5), est qu'aucun acier ne peut garantir absolument contre les

ruptures fragiles, mais j'admets qu'il y a lieu de s'efforcer de mettre en œuvre, selon les cas, des aciers qui ont le moins de chances de présenter des facteurs propres, intrinsèques, susceptibles de favoriser des ruptures fragiles. On voit que c'est là une question de probabilité, qui conduit à évoquer la conception probabiliste de la sécurité des constructions (20). Un de ses meilleurs protagonistes (M. M. PROT) a fait remarquer depuis longtemps que les produits dont on demande des propriétés particulières élevées présentent souvent ces qualités avec une plus grande dispersion que les produits dont on ne demande que des qualités moyennes. En d'autres termes, les produits de qualité spéciale présentent plus de risques de déficience, en raison naturellement de leur élaboration plus délicate. Cela est cohérent avec ce que j'exprimais plus haut au sujet du caractère industriel des produits. La modification de ces caractères par le contrôle et le triage se heurte aux limites économiques pour des produits semi-finis et des productions de masse.

Mon opinion reste donc que les efforts du constructeur doivent porter surtout sur l'élimination, par la conception correcte des ponts soudés, des causes mécaniques de ruptures fragiles, à défaut desquelles celles-ci ne peuvent se produire, car il ne peut y avoir de ruptures, fragiles ou autres, spontanées, c'est-à-dire sans intervention mécanique, c'est-à-dire sans action de tensions ou de libération d'énergie.

Je n'ose avancer avec quelque certitude que l'expérience exceptionnelle et surprenante que je vais relater puisse réellement montrer le caractère illusoire de la recherche d'une inhibition matérielle des ruptures fragiles. On sait que, généralement, quel que soit l'acier, fragile ou non, on est obligé pour essayer de produire des ruptures fragiles de recourir à des entailles ou autres altérations géométriques des éprouvettes ; j'ai relaté avec assez de détails mes propres tentatives de produire des ruptures fragiles dans les aciers du pont de Hasselt (4) (5), qui ont abouti à l'emploi d'entailles.

Or, assez récemment, le fait que l'on n'avait jamais pu obtenir en s'y ingéniant, au moyen d'aciers dénoncés comme fragiles, s'est prouvé d'une manière imprévue : des ruptures entièrement fragiles à la température ordinaire, sur des barreaux non entaillés au naturel, et cela d'une manière reproductible, aussi bien en long (sens du laminage) qu'en travers. Les courbes de traction ont l'allure caractéristique de celles des ruptures sans striction que j'ai signalées en 1944 (4) (5). Les analyses de l'acier sont les suivantes :

	Université Liège (Génie Civil)	Centre nat. de Métallurgie (Section Liège)		
C %	0,10	0,09	— 0,09	— 0,08
P %	0,07	0,108	— 0,108	— 0,108
S %	0,085	0,085	— 0,075	— 0,079
Si %	0,01	—		
Mn %	0,35	0,37	— 0,38	
N %	—	0,0118	— 0,0119	— 0,0119
O %	—	0,036	— 0,031	— 0,032
Al %	—	faible quantité	(analyse	spectrochimique).

Les figures 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8 reproduisent les courbes de traction, les micrographies et les aspects des ruptures. Remarquer sur la figure 8 les multiples amorces de rupture. Les allongements de rupture sont 15,4 % en long et 14,2 % en travers, ce qui n'est nullement mauvais, attendu qu'il s'agit là de ce qu'on appelle l'allongement uniformément réparti, sans intervention de striction.

Le point gênant dans ce résultat inattendu, c'est que l'acier n'est plus identifiable. Il a été prélevé dans un lot de tôles qui restent d'essais de soudabilité effectués à la demande de la Commission mixte des aciers en 1945-1946, dont la plupart des pièces portent encore des marques d'identification, mais pas toutes. Par la comparaison avec les résultats des essais effectués en 1945-1946, on est porté à présumer qu'il s'agit d'une tôle d'acier 37-45 de 25 mm d'épaisseur qualifiée à haute soudabilité, présomption non contradictoire avec les faibles quantités d'Al relevées dans l'analyse spectrochimique. Mais il ne s'agit que d'une présomption. J'ai signalé, lors des leçons de Chaire Francqui prérappelées, que ces essais avaient déjà réservé des surprises, notamment des ruptures sans striction sur des barreaux non-entaillés d'une tôle d'acier 37-45 de 25 mm d'épaisseur, de soudabilité courante, après écrouissage de 5 % et après le même écrouissage et vieillissement artificiel à 250° C pendant 30'. Ensuite, deux cassures fragiles sur des barreaux non-entaillés extraits de plats d'acier 52-62 à haute soudabilité à l'état brut de laminage mais portant deux cordons longitudinaux parallèles de soudure dans les axes des faces de laminage. Or, je dois rappeler que sur les aciers du pont de Hasselt, cependant suspects, on n'a jamais pu obtenir de ruptures fragiles sans entailles et rarement par des cordons de soudure multiples et durs.

Le moins que tous ces faits expérimentaux puisse m'inspirer comme réflexion, c'est qu'ils ne sont pas de

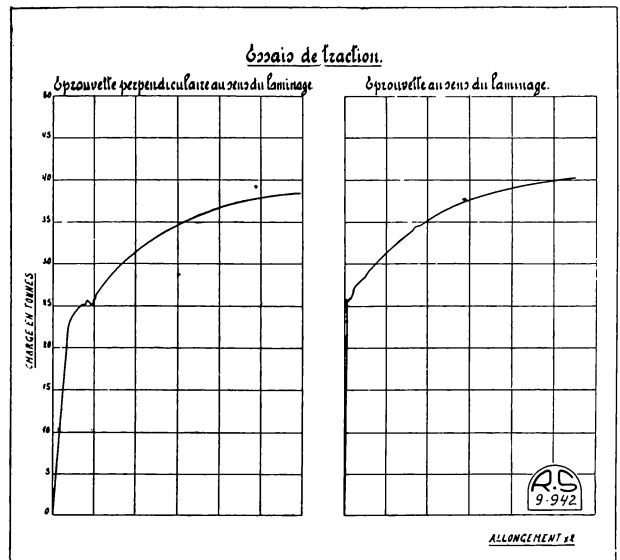


Fig. 1. — Courbes de traction.

nature à modifier les opinions que j'ai exprimées ci-dessus et mon manque de confiance dans les prétendus critères expérimentaux de soudabilité et de garantie contre les ruptures fragiles.

Par contre, ils me rappellent de vieux souvenirs de l'époque heureuse où, sur les bancs de l'Université, je recevais une initiation à la métallurgie, que je ne jugeais pas toujours assez moderne. Mais j'avais appris ainsi que de fortes teneurs en soufre et en phosphore, dénommées alors impuretés, provoquaient la fragilité de l'acier. Je pense donc que l'analyse chimique conserve du bon, même si elle n'est plus moderne. Il suffit en effet de remarquer les teneurs en P et S des échantillons prélevés

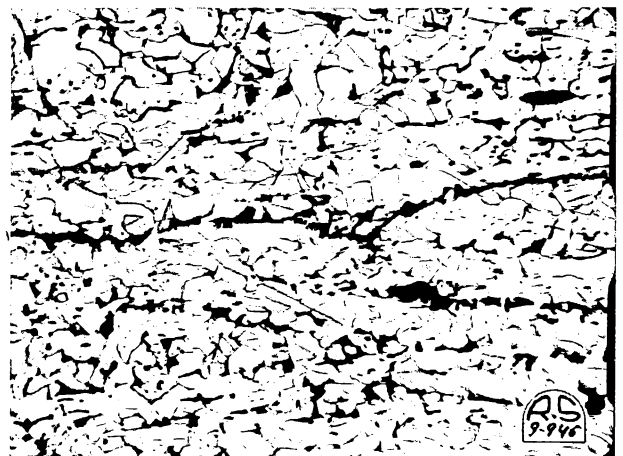


Fig. 2. — Micrographie de l'éprouvette longitudinale, dans la partie ségréguée et suivant le sens longitudinal.



Fig. 3. — Micrographie comme dans la figure 2, après normalisation à 925°C pendant 30 minutes.

sur les éprouvettes rompues sans striction. Ceci me remet aussi en mémoire une histoire apprise assez récemment. Un cargo mixte, partiellement soudé, aurait eu des fissures dans une tôle soudée d'about, qui auraient exigé un remplacement de cette tôle dans le port de New York. Des échantillons de cette tôle ont été soumis à des essais d'une certaine nature destinés à caractériser la soudabilité par des voies compliquées dont les résultats sont exprimés en termes aussi compliqués. Le résultat a été que cette tôle était très mauvaise. L'analyse chimique effectuée en dernier ressort a révélé des teneurs aussi élevées en P que celles citées plus haut, moindres en S. Mon avis est que l'on aurait pu commencer par là et épargner le reste ; encore est-il vraiment à l'honneur des

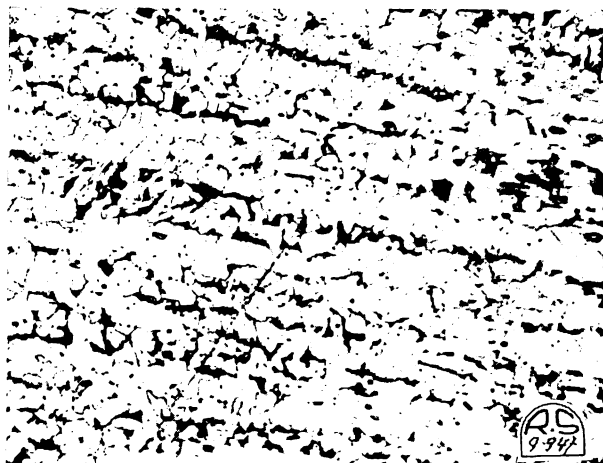


Fig. 4. — Micrographie de l'éprouvette transversale, dans la partie ségréguée et dans le sens longitudinal.

essais compliqués qu'ils n'aient pas été en contradiction avec ce que l'analyse chimique établissait.

Je crois que ces réflexions ne sont pas loin de me placer en assez grande communauté de vues générales avec M. H. GRANJON, dont j'ai beaucoup apprécié l'étude publiée récemment dans la Revue de la Soudure (31) et dont les opinions sont fondées non seulement sur des recherches et des travaux remarquables, mais aussi sur un jugement très objectif et très sain.

J'ai déjà fait remarquer que les courbes de traction de la figure 1 ont exactement la même allure que celle obtenue lors des ruptures fragiles de barreaux entaillés (4) (5). C'est donc l'allure caractéristique des ruptures sans striction. On remarquera que ces ruptures se situent toujours au delà de la limite apparente d'élasticité et laissent subsister le palier d'étirage. Contrairement à une opinion assez répandue je crois, mais qui n'est pas congruente avec les prémisses de la théorie de l'élasto-plasticité, ainsi que je l'ai fait remarquer déjà lors de mes leçons de Chaire Francqui à l'Université de Bruxelles, la rupture fragile n'interfère pas le moins du monde avec cette théorie et ses conclusions, puisque le palier d'étirage n'est pas affecté. La seule condition requise par la théorie de la plasticité est celle de l'existence d'un palier d'étirage caractérisé et étendu, dont il convient de vérifier expérimentalement la qualité et la valeur.

La rédaction de ma communication était terminée lorsque j'ai reçu tout récemment de Philadelphie (36) un résumé d'une enquête critique du Professeur M. E. SHANK, du Massachusetts Institute of Technology, sur les ruptures fragiles dans les constructions en acier autres que des navires. Je crois utile de joindre en annexe à cette communication une traduction de ce résumé, où l'on trouvera généralement une grande concordance avec ce qui précède et tout ce que j'ai déduit de mes observations, de mes expériences et des faits parvenus à ma connaissance depuis plus de vingt ans. Les conclusions en sont d'ailleurs identiques aux miennes, étant donné que je ne puis pas séparer la sélection des matériaux de l'étude dans la conception de l'ouvrage.

Sans doute faut-il que j'aborde aussi, au moins sommairement, la question des tensions résiduelles. M. A. DUNOYER, dans sa communication de Paris (2) comme dans son intervention au Congrès de Cambridge (3) affirme le danger né des tensions résiduelles et leur attribue le rôle essentiel dans les ruptures de ponts soudés. Il se base sur une conférence du Dr. R. WECK (32) pour écrire : « L'existence des contraintes propres dans un ouvrage est donc bien la condition indispensable pour la production de ruptures fragiles » (2). Or,

c'est là ce que je n'ai cessé d'affirmer depuis avant même l'accident du pont de Hasselt en mars 1938 ; en réalité depuis 1936, lorsque j'ai orienté les études qui m'étaient demandées par un consortium de constructeurs et l'Administration des Ponts et Chaussées vers les questions du retrait et des tensions de soudure. Et quelle meilleure preuve de l'exactitude de cette opinion pouvait-on trouver ailleurs qu'en Belgique où, en 1939, sous les auspices de la Commission officielle d'enquête sur les accidents des ponts soudés (j'entends par là la première, qui seule a effectivement fonctionné), on sciait les soudures principales de liaison des goussets des poutres Vierendeel aux pattes d'attaches, dans le but d'augmenter la sécurité des ponts par une destruction organisée de certains assemblages. Cela n'était pas sans danger parce que sous l'action des tensions résiduelles ainsi mises en évidence, les soudures cassaient avec un bruit d'explosion après un sciage partiel. Mais, ainsi qu'on le sait, nul n'est prophète dans son pays. On peut espérer que revenues en Belgique sous des auspices franco-britanniques, des opinions justes sur la nocivité des tensions résiduelles seront désormais admises unanimement. Il se peut qu'elles aient d'ailleurs bientôt le Patronage des Trois Grands. En effet, on annonce pour le printemps prochain la publication du « Monograph on residual stresses » sous les auspices du « Committee on residual stresses of the Division of Engineering and Industrial Research », du « National Research Council » à Washington D.C.

Cet ouvrage réunira les contributions d'une quarantaine de spécialistes qui ont été invités à participer à l'établissement du « Monograph » sur la base d'un programme daté du 5 décembre 1950 et qui leur a été communiqué à la fin de février 1951. Dix-huit Européens figuraient sur la liste originale des collaborateurs ; la date d'envoi des contributions était fixée au 15 septembre 1951. Si j'en juge par ma correspondance avec M. W. R. OSGOOD, la mise au point des textes a été très soignée et très approfondie. Les trois premiers paragraphes de l'introduction au programme étaient libellés comme suit :

« Actuellement, les effets des tensions résiduelles sur les performances mécaniques des constructions soudées ne sont pas bien compris. L'absence de connaissances adéquates à ce sujet est mise en lumière par le fait que des opinions contradictoires sur l'action des tensions résiduelles existent parmi des personnes dont l'autorité en la matière est reconnue.

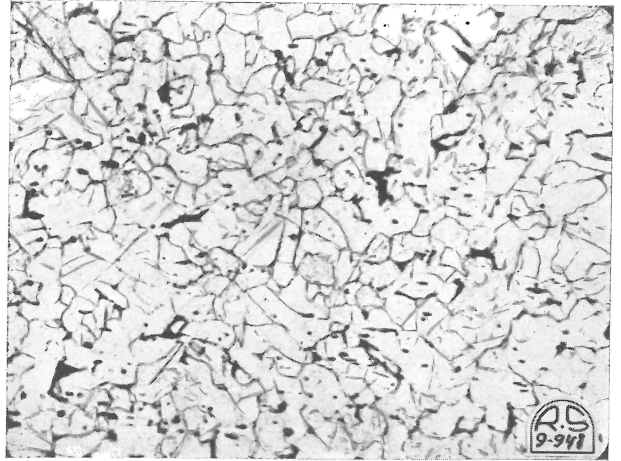


Fig. 5. — Micrographie de l'éprouvette transversale, dans la partie non ségrégée et dans le sens transversal.

Un exemple de controverse courante est le débat sur la signification de tensions résiduelles dans les ruptures fragiles de navires marchands soudés. Bien que de nombreuses personnes aient l'opinion que les tensions introduites dans les structures de navires comme conséquences des procédés de fabrication « ne contribuent pas matériellement à la rupture », des arguments contraires ne peuvent pas être écartés avec intégrité.

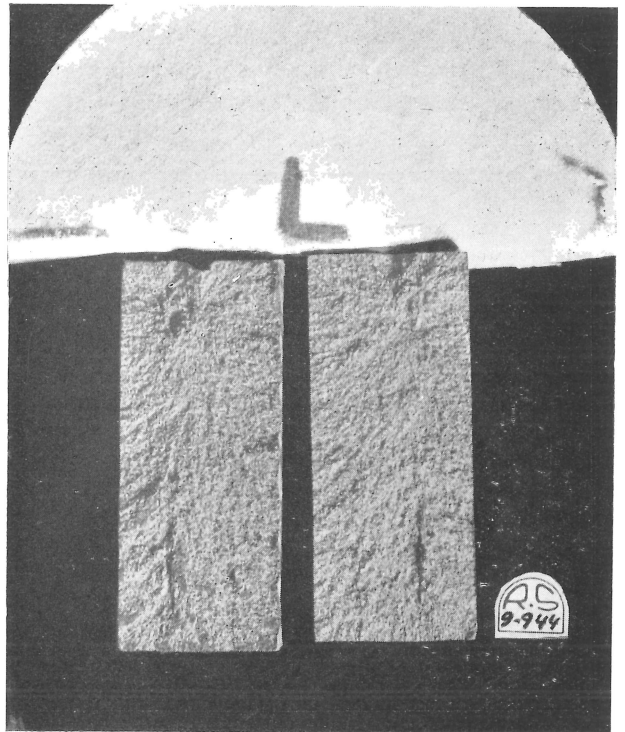


Fig. 6. — Eprouvette longitudinale, aspect de la cassure.

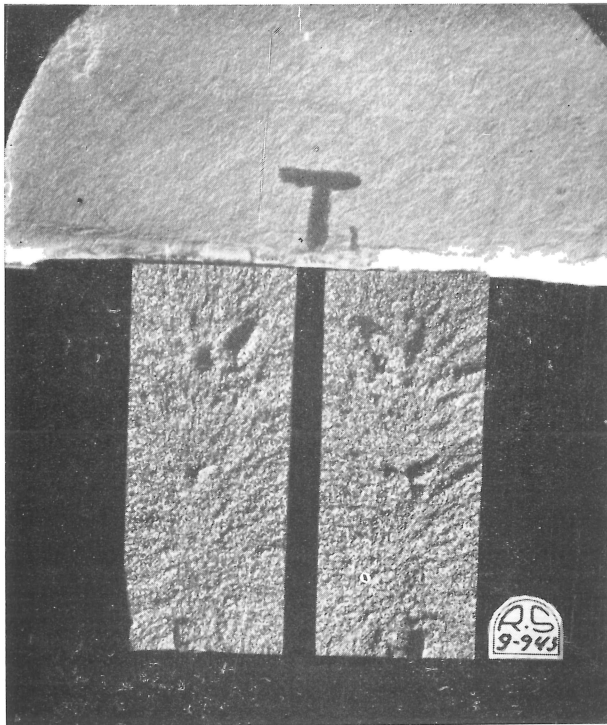


Fig. 7. — Epreuve transversale, aspect de la cassure.

L'évidence en faveur de la conclusion précédente a été obtenue d'investigations de laboratoires sur des angles d'écouilles factices, par le fait que les essais n'ont pas révélé d'effets significatifs sur la résistance des spécimens dus à la présence de tensions résiduelles. Des opinions opposées ont été cependant avancées, bien qu'appuyées par peu, si même il y en a, d'évidence expérimentale ».

Ma contribution a consisté surtout à apporter un assez

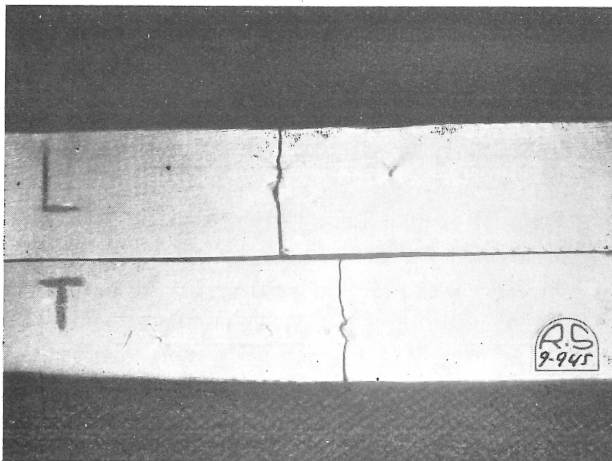


Fig. 8. — Aspect extérieur des éprouvettes longitudinales (L) et transversale (T) après rupture.

grand nombre de ces dernières évidences non seulement expérimentales mais aussi empruntées à l'observation courante, dont j'ai fait part déjà dès 1936 et dans la suite dans de nombreuses communications et publications (38) (4) (5) (8) (34). Les Américains ont déjà reconnu et souligné l'influence considérable des tensions résiduelles sur le phénomène du flambage. L'enquête récente précitée du Professeur M. E. SHANK, de Boston, admet déjà l'effet important des tensions résiduelles sur les ruptures fragiles (36). [Voir annexe].

Puisque j'ai fait allusion plus haut à la théorie élastoplastique, j'ajouterai une remarque que je crois importante. Si les ruptures fragiles se situent en dehors du champ de cette théorie, par contre les tensions résiduelles l'occupent entièrement comme des parasites très dangereux. Elles peuvent être accompagnées dans les constructions soudées de déformations plastiques qui ne laissent plus rien ou presque rien subsister du palier d'étrirage, dont l'existence et l'étendue forment la base unique et la condition *sine qua non* de la théorie de la plasticité. Ce sont donc les tensions résiduelles et les déformations permanentes qui peuvent mettre cette théorie en défaut pour les constructions soudées et ouvrir dès lors la voie aux ruptures fragiles. C'est pourquoi il peut y avoir lieu d'exiger des aciers pour les constructions soudées un palier d'étrirage bien caractérisé et très étendu. On remarquera que celui de la figure 1 n'est pas satisfaisant ; il correspond d'ailleurs à un acier inacceptable.

Je ne traiterai pas ici des précautions à prendre contre les tensions résiduelles ni des techniques propres à les réduire, puisque j'ai renvoyé en commençant au mémoire de M. H. LOUIS (1). Mais je terminerai par une remarque importante, qui est le résultat des études expérimentales effectuées dans mes laboratoires sur le fluage et la relaxation des métaux à la température ordinaire (35). Elles ont établi que la relaxation des aciers doux au delà de la limite apparente d'élasticité est très faible, à peine de quelques %. Il en résulte que l'idée à laquelle se sont accrochés tant de praticiens, que les tensions résiduelles se résorbent à la longue, est entièrement injustifiée ; il n'y a pas de relaxation totale et les tensions résiduelles ne peuvent subir à la température ordinaire qu'une très faible relaxation. Une relaxation importante ne peut être obtenue que par des traitements mécaniques (écrouissage) ou thermiques (recuit) appropriés, dont je ne discuterai d'ailleurs pas ici l'opportunité pour les ponts soudés, renvoyant encore pour ce point au mémoire de M. H. LOUIS (1), qui en cite des applications.

Après avoir successivement considéré les questions de la qualité des aciers, des ruptures fragiles et des tensions résiduelles, je terminerai par quelques réflexions sur la conception des ponts soudés, qui est la question principale, car elle contient toutes les autres. En effet, il n'y a pas de conception digne de ce nom si la qualité des aciers, la prévention des ruptures fragiles et la réduction des tensions résiduelles ne sont pas prises en complète considération, en même temps que toutes les autres questions relatives à la soudure d'un ouvrage important. La conception est donc une synthèse, qui requiert une haute formation générale, une expérience suffisante et une formation particulière complète. En ce sens, la conception de la plupart des ponts soudés belges, de la catégorie de ceux qui ont subi des ruptures, était réellement inexistante, car ni la qualité des aciers, ni le danger des ruptures fragiles, ni les tensions résiduelles, ni le retrait n'avaient reçu la moindre considération. Même l'adoption de la poutre Vierendeel était accidentelle.

En fait, ce type de poutre avait été choisi pour les ponts rivés. Les premiers ponts soudés étaient des contre-projets de ponts rivés et le constructeur aurait sans doute été mal avisé si, en plus de changer la technique d'assemblage, il avait encore modifié le type de poutre. Les auteurs des projets de ponts soudés belges n'ont donc pas choisi le type de poutre Vierendeel pour des raisons inhérentes à la construction soudée.

Cependant, le Professeur F. STUSSI, dans une conférence qu'il a faite en septembre 1951 à l'Institution of Structural Engineers à Londres, dont il a reproduit l'essentiel dans une communication au 4^e Congrès de l'Association internationale des Ponts et Charpentes à Cambridge en août 1952 (35) a préconisé la poutre Vierendeel, dans la forme de son application aux anciens ponts soudés belges. Je puis accepter son point de vue sous les conditions suivantes :

- a) constitution appropriée des sections transversales des membrures ;
- b) recours à des montants de rigidité modérée ;
- c) conformation adéquate des goussets à courbure variable d'un développement très réduit.

J'espère avoir bientôt le temps de préparer la publication des résultats des essais statiques et dynamiques sur modèles de nœuds rigides de charpentes soudées effectuées avec la collaboration de M. Ch. MASSONNET. Ils établissent bien au delà de mes propres prévisions l'avantage des nœuds de petit développement, accentuant ainsi la gravité de l'erreur commise dans la plupart des anciens ponts soudés belges, dont les gous-

sets avaient été conservés volumineux par principe et les montants également très rigides.

Si l'on me demandait des modèles de conception de ponts soudés auxquels je reconnais beaucoup de qualités, sinon toutes, je devrais citer en premier lieu des ponts français. Celui de Joncherolles, pont-rail dû à M. L. CAMBOURNAC ; celui de Neuilly, dû à M. L. A. LEVY ; le pont Corneille à Rouen, dû à M. D. LAVAL. J'y ajouterais des ponts de Stockholm, à certains desquels a beaucoup contribué M. S. KASARNOWSKY ; enfin des ponts espagnols de M. le Professeur E. TORROJA.

Dans les très importantes remarques finales par lesquelles M. L. CAMBOURNAC a clos la discussion de la communication faite sous sa présidence par M. A. DUNOYER le 18 mars 1952 (2), il indique que le 3^e Congrès de l'Association internationale des Ponts et Charpentes à Liège en 1948 a conclu que la conception et les formes de la construction soudée étaient les facteurs essentiels de sa bonne tenue en service (21). Il craint que ces conclusions laissent de côté les qualités à requérir du métal de base et du métal d'apport et le perfectionnement des méthodes de soudure. Il préconise la collaboration de représentants de la métallurgie, de la construction, de l'industrie du métal d'apport et du matériel de soudage, enfin des utilisateurs. En réalité, il s'agit de s'entendre sur le mot conception, dont M. L. CAMBOURNAC semble envisager une acception assez restreinte, qui s'identifierait presque avec le mot formes, cependant accolé à conception et donc différent. Ainsi que je l'ai indiqué, l'acception de la notion de conception doit être synthétique ou complète, si l'on préfère. La forme y joue certes un grand rôle (exemples de la section transversale de la membrure inférieure du pont de Joncherolles, des formes des goussets, des profils des diagonales, etc.). Mais ces formes, à certains exemples desquels je viens de faire allusion, ont une inférence directe sur la réduction des tensions résiduelles et sur la prévention des ruptures fragiles. En outre, on ne conçoit pas que l'auteur d'un ouvrage étudié et dressé avec tant d'intelligence de la question et tant d'habileté n'ait pas songé à prendre des dispositions judicieuses quant aux qualités et garanties des aciers et des électrodes et ne se soit pas inquiété suffisamment des méthodes de soudage, encore que sur ce point il faille laisser assez de latitude à l'atelier de construction. En réalité, cette notion étendue de la conception est traditionnelle dans la construction des ponts métalliques et elle régissait entièrement la construction des ponts rivés.

Les conclusions du 4^e Congrès de l'Association internationale des Ponts et Charpentes à Cambridge en 1952 (22) contiennent ce qui suit, qui rencontre les préoccupations de M. L. CAMBOURNAC : « Les spécifications qui fixent le choix et les conditions de réception des aciers à utiliser dans le domaine des ponts et charpentes soudés, et qui diffèrent suivant la nature, l'importance, la difficulté constructive des ouvrages, ainsi que la température en service, doivent continuer à faire l'objet d'études entre sidérurgistes et constructeurs afin de donner aux constructeurs le guide sûr qui leur fait encore défaut pour leur choix ».

Mais elles se terminent par :

« L'expérience montre que la réalisation économique des ouvrages soudés dépend du soin apporté à la conception et à l'exécution ». Cette conclusion finale a été suggérée par le Dr. E. E. HOWARD, conseiller technique américain de l'Association internationale des Ponts et Charpentes. Cette confirmation américaine d'une conclusion analogue au congrès précédent et d'origine européenne est certes édifiante.

Cette conclusion me ramène à mes prémisses : un pont soudé est un ouvrage d'art et un chef d'œuvre de la construction soudée. Elle exige des qualités et des capacités personnelles adéquates à tous les stades de la réalisation : conception, études, exécution et contrôle.

Lors de la discussion au Building Research Congress à Londres en 1951 (12), un auditeur a jugé ces idées décourageantes. J'ai répondu qu'elles avaient au contraire pour but d'encourager les efforts nécessaires pour arriver à la maîtrise de ces questions mais que, dans ce domaine, il n'y avait pas d'à peu près, ni d'illusions à entretenir. Chacun doit apprécier ce qu'il peut entreprendre, chacun doit connaître ses limites.

Il y a dans tous les pays actuellement un nombre restreint de personnes et d'institutions privées ou officielles aptes à intervenir de l'une ou l'autre manière dans la réalisation de ponts soudés et le succès doit naître de leur conjonction. Ainsi que l'expriment aussi les conclusions du 4^e Congrès de l'Association internationale des Ponts et Charpentes (22), la multiplication du nombre de réalisations couronnées de succès dans le domaine des ponts soudés et celle des études et des recherches auxquelles elles auront donné lieu augmenteront progressivement la diffusion des connaissances et le nombre des experts.

Dans notre pays, la situation est analogue et, comme il y vingt ans passés, les conditions suffisantes et nécessaires pour réussir la construction de ponts soudés existent. Mais pas plus qu'alors, il n'est permis d'ignorer

ou de sous-estimer les conditions requises et les précautions nécessaires, pas plus qu'alors il n'est permis d'en faire une entreprise banale.

POST-SCRIPTUM

Après la conférence du 26 novembre 1953, j'ai eu l'attention attirée sur une remarquable communication de M. P. WIDMAN, intitulée « Les ponts-rails soudés de la région Nord de la S.N.C.F. », qui a été publiée dans le Vol. V, n^{os} 7-8 de juillet-août 1951 de la revue « Soudure et Techniques connexes ». Il y est rendu compte notamment de la tenue parfaite de 6 ponts-rails importants, en service depuis 1936 à 1939.

Cet article m'a remis en mémoire qu'il existe en Belgique des ponts-rails soudés à peu près contemporains des ponts français précités et dont la tenue en service est sans reproches.

Il s'agit d'abord des travées d'approche du pont-rail de Gellik sur le Canal Albert. Ces travées ont été mises en service en été 1938. L'une d'elles a été l'objet d'une auscultation dynamique par le Professeur M. ROS de Zurich, le 8 octobre 1938, à laquelle j'ai participé avec quelques collaborateurs et quelques appareils.

Les autres constituent une partie de la plate-forme surélevée de la Gare du Midi à Bruxelles. J'y ai procédé en mars 1939 avec M. H. LOUIS à des mesures de tensions de soudures, qui furent trouvées modérées.

En avril 1940, la S.N.C.B. me pria de même de procéder à des essais de charge statiques et dynamiques, qui furent effectués avec la collaboration de MM. H. LOUIS, R. DANTINNE et R. JACQUEMIN et dont les résultats furent très satisfaisants.

Bien que l'on attribue aux ponts-rails une sollicitation dynamique plus accusée que celle des ponts-routes, le passage inférieur du Zoo à Berlin est le seul ouvrage soudé sous voie ferrée qui ait subi des avaries (1936) et encore sans conséquences graves. Il est clair que des incidents de cette nature ne sont donc pas inhérents intrinsèquement aux ponts soudés, mais qu'ils sont accidentels.

ANNEXE

Résumé de

Une enquête critique sur les ruptures fragiles dans les constructions en acier au carbone autres que des navires

par le Professeur M. E. SHANK
Massachusetts Institute of Technology

La rupture de navires en mer ou à quai pendant la deuxième guerre mondiale a mis le problème des rup-

tures fragiles en vive lumière. Des informations sur les ruptures de navires ont fait l'objet de bonnes corrélations et, en conséquence, beaucoup a été appris des recherches qu'elles ont stimulées. Il n'existe pas de corrélation similaire pour les ruptures de constructions autres que des vaisseaux. Une enquête a été entreprise pour cette raison en vue de compléter l'étude des ruptures de navires. Au total 132 ruptures ont été étudiées. Ces ruptures se sont produites dans des constructions rivées et soudées telles que des réservoirs, des ponts, des réservoirs sous pression, des conduits de fumée, des collecteurs de conduites forcées, des pelles mécaniques et des conduites de gaz. L'histoire des ruptures fragiles remonte au moins à 1879. On en conclut ce qui suit :

1. Les ruptures fragiles dans les structures autres que les navires constituent le même phénomène que celui qui se produit dans les navires.
2. Les ruptures fragiles adviennent dans de nombreux types de constructions autres que les vaisseaux.
3. Les ruptures fragiles peuvent traverser des joints rivés.
4. Il n'y a pas d'évidence que le pourcentage de ruptures fragiles soit diminué ou augmenté par l'introduction de la soudure.
5. En conjonction avec d'autres facteurs, les tensions thermiques peuvent être importantes.
6. Les tensions résiduelles ne sont pas la cause unique de ruptures fragiles, mais de telles tensions peuvent, en conjonction avec d'autres facteurs, être la cause initiale de telles ruptures.
7. L'effet de facteurs métallurgiques est important.
8. L'érouissage à froid favorise la susceptibilité aux ruptures fragiles, mais son rôle ne peut être défini, faute d'informations suffisantes.
9. Dans les cas où l'information est donnée, les résiliences étaient généralement faibles à la température de la rupture.

10. Dans la plupart des cas de ruptures fragiles de constructions autres que des navires, la rupture a eu son origine dans des défauts de fabrication. Certains ont eu leur origine dans des défauts du projet.
11. Il semble établi que dans tous les cas les ruptures ont eu pour point de départ une discontinuité géométrique.
12. Il n'y a aucune indication pour ces constructions rompues au sujet de l'effet de divers procédés de soudage sur la susceptibilité aux ruptures fragiles.
13. Excepté dans le cas de soudures particulièrement mauvaises, les ruptures fragiles ne tendent pas à suivre les cordons de soudure.
14. La grande majorité des ruptures fragiles de constructions autres que des navires se sont produites dans des conditions de charge entièrement statique.
15. L'âge des constructions ne paraît pas avoir de portée sur les ruptures fragiles.
16. La plupart des codes de constructions permettent l'emploi d'aciers qui sont connus comme particulièrement susceptibles de ruptures fragiles. En même temps, dans tous les codes sauf un, les tensions admissibles sont tenues à des valeurs très modérées.
17. Finalement, il est établi que les ruptures fragiles résultent d'une combinaison de nombreux facteurs. Il n'y a pas de matériaux pratiquement disponibles qui pourraient entièrement prévenir leur occurrence et il n'y a pas d'essai connu qui puissent sûrement prédire, d'après le comportement de petits spécimens, les performances d'un acier donné dans les circonstances où des ruptures fragiles pourraient se produire.

En bref, un projet attentif, la sélection des matériaux et une bonne manufacture sont de la plus haute importance pour la prévention de ruptures fragiles dans les constructions autres que les navires. Cela est vrai aussi des navires.

(Traducteur : F. CAMPUS.)

INDEX BIBLIOGRAPHIQUE

- (1) H. LOUIS — *Conception, exécution et contrôle des constructions soudées*. — Revue Universelle des Mines, mai 1953.
- (2) A. DUNOYER — *La soudure dans la construction métallique* — Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics, n° 69, septembre 1953.

- (3) A. DUNOYER — *Possibilité de plastification des assemblages soudés* — Rapport final du 4^e Congrès de l'Association internationale des Ponts et Charpentes — Cambridge 1953.
- (4) F. CAMPUS — *Recherches, études et considérations sur les constructions soudées* — Ed. Sciences et Lettres — Liège — 1946.

- (5) F. CAMPUS — *Questions fondamentales en matière de constructions soudées* (conférences faites à Zürich en février 1947) — Bulletin du CERES, Tome II, 1947.
- (6) F. CAMPUS — *The needs of research on the application of welding in steel building structures* — Building Research Congress — Londres, 1951.
- (7) F. CAMPUS — *Les nouveaux instituts universitaires du Val-Benoît* — Annuaire de l'A. I. Lg., fasc. 3 et 4, 1931.
- (8) F. CAMPUS — *Le contrôle des constructions soudées* — Revue Universelle des Mines, juin 1938.
- (9) F. CAMPUS, H. LOUIS et P. GALLER — *Construction et restauration de la charpente métallique continue soudée en acier à haute résistance de l'Institut du Génie Civil de l'Université de Liège — Construction et caractéristiques principales* — L'Ossature métallique, n° 12, 1948.
- (10) F. CAMPUS — *Les charpentes métalliques continues* — 2° Congrès national des Sciences, Bruxelles 1935.
- (11) F. CAMPUS et A. SPOLIANSKY — *Progrès réalisés de 1932 à 1936 dans l'application de l'acier en Belgique* — 2° Congrès de l'Association internationale des Ponts et Charpentes — Rapport préliminaire — Berlin, 1936.
- (12) F. CAMPUS — *Discussion dans « Building Research Congress 1951 — Record of Discussion »* — page 34 — Londres, 1951.
- (13) A. SPOLIANSKY — *Les ponts soudés en Belgique* — Revue Universelle des Mines, juin 1935.
- (14) H. SANTILMAN — *Le nouveau pont de Lanaye sur le Canal Albert* — Annales des Travaux publics de Belgique, décembre 1933.
- (15) F. CAMPUS et A. SPOLIANSKY — *Rapport final du 1^{er} Congrès de l'Association internationale des Ponts et Charpentes* — Paris, mai 1932, pp. 254-259.
- (16) F. CAMPUS — *Etudes et essais relatifs aux nœuds de charpente* — Revue Universelle des Mines, 1^{er} et 15 janvier, 15 février 1933.
- (17) F. CAMPUS — *Nœuds rigides de charpentes métalliques continues* — 2° Congrès de l'Association internationale des Ponts et Charpentes — Publication préliminaire — Berlin, 1936.
- (18) M. STORRER et A. SPOLIANSKY — *Le pont tournant du Muide à Gand* — L'Ossature métallique, n° 6, 1933.
- (19) A. SPOLIANSKY — *Le pont « C » d'Herenthals sur le Canal Albert* — L'Ossature métallique, n° 9, 1934.
- (20) F. CAMPUS et H. LOUIS — *Le contrôle radiographique des constructions soudées* — Revue Universelle des Mines, juillet 1939.
- (21) *Conclusions du 3^e Congrès de l'Association internationale des Ponts et Charpentes* — Liège, 1948. Rapport général, Liège, 1949.
- (22) *Conclusions du 4^e Congrès de l'A.I.P.C. 1952 de Cambridge et Londres* — Bulletin de l'Association internationale des Ponts et Charpentes, n° 12, 15 juin 1953.
- (23) LA MOTTE-GROVER — *Revue de la Soudure*, n° 4, 1946.
- (24) L. REEVE — *Examination of welded steel specimens from the Hasselt Bridge — Report by members of the R. 11 Sub-committee on the weldability of high tensile structural steels of the Welding Research Council of the Institute* — Quarterly Transactions of the Institute of Welding, n° 1, January 1940.
- (25) H. BUSCH et N. REULECKE — *Untersuchungen über Risserscheinungen an einer geschweissten Brücke* — Stahl und Eisen, 22 janvier 1942.
- (26) A. FRY et L. KIRSCHFELD — *Ueber die Alterungsempfindlichkeit von Baustählen hoher Festigkeit* — Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, 6 mars 1943.
- (27) F. CAMPUS — *Questions fondamentales en matière de constructions soudées* — Schweizer Archiv für angewandte Wissenschaft und Technik, n° 5, mai 1948.
- (28) F. CAMPUS — *Le problème scientifique des assemblages soudés* — Revue Universelle des Mines, mai 1953.
- (29) Ed. AMSTUTZ — *Einige allgemeine Ueberlegungen zur Prüfung der Stähle auf Sprödbbruchneigung* — Schweizer Archiv für angewandte Wissenschaft und Technik, mai 1952.
- (30) *3^e Congrès de l'Association internationale des Ponts et Charpentes* — Liège 1948 — Publication préliminaire et rapport final.
- (31) H. GRANJON — *Quelques aspects des études sur la soudabilité entreprises en France à l'Institut de Soudure* — Revue de la Soudure, n° 3, 1953.
- (32) R. WECK — *Idées actuelles sur les contraintes résiduelles (contraintes propres) dans les constructions soudées* — Communication aux Journées internationales de la soudure à Bruxelles, 9 juin 1948.
- (33) F. CAMPUS — *Contrôle des ponts et charpentes soudés* — Rapport final du 2° Congrès de l'Association internationale des Ponts et Charpentes - Berlin, octobre 1936.
- (34) F. CAMPUS — *Essais de fatigue de joints soudés de rails* — Revue Universelle des Mines, 15 juin 1938.
- (35) F. STUSSI — *La soudure et les assemblages soudés* — Rapport final du 4° Congrès de l'Association internationale des Ponts et Charpentes — Cambridge 1952.
- (36) *Abstract of a critical survey of brittle fracture in carbon plate steel structures other than ships*, by Prof. M. E. SHANK — Massachusetts Institute of Technology — Testing Topics, Vol. 8, n° 4, October, November, December 1953. (Le texte intégral de l'enquête sera publié dans le courant de 1954 sous les auspices du Ship Structure Committee à Washington).