

Les constructions soudées: le point de vue d'un constructeur après 25 ans de pratique

Autor(en): **Chevalley, Auguste**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **71 (1945)**

Heft 22

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-54106>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

BULLETIN TECHNIQUE

DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

ABONNEMENTS :

Suisse : 1 an, 13.50 francs

Etranger : 16 francs

Pour sociétaires :

Suisse : 1 an, 11 francs

Etranger : 13.50 francs

Prix du numéro :

75 centimes

Pour les abonnements
s'adresser à la librairie
F. Rouge & C^{ie}, à Lausanne.

Organe de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Sociétés vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des anciens élèves de l'Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale.

COMITÉ DE PATRONAGE. — Président : R. NEESER, ingénieur, à Genève ; Vice-président : G. EPITAUX, architecte, à Lausanne ; secrétaire : J. CALAME, ingénieur, à Genève. Membres : *Fribourg* : MM. L. HERTLING, architecte ; P. JOYE, professeur ; *Vaud* : MM. F. CHENAUX, ingénieur ; E. ELSKES, ingénieur ; E. JOST, architecte ; A. PARIS, ingénieur ; Ch. THÉVENAZ, architecte ; *Genève* : MM. L. ARCHINARD, ingénieur ; E. MARTIN, architecte ; E. ODIER, architecte ; *Neuchâtel* : MM. J. BÉGUIN, architecte ; R. GUYE, ingénieur ; A. MÉAN, ingénieur ; *Valais* : M. J. DUBUIS, ingénieur ; A. DE KALBERMATTEN, architecte.

RÉDACTION : D. BONNARD, ingénieur, Case postale Chauderon 475, LAUSANNE.

Publicité :
TARIF DES ANNONCES

Le millimètre
(larg. 47 mm.) 20 cts.
Tarif spécial pour fractions
de pages.

En plus 2. % de majoration de guerre
Rabais pour annonces
répétées.



ANNONCES-SUISSES S.A.
5, rue Centrale
LAUSANNE
& Succursales.

CONSEIL D'ADMINISTRATION DE LA SOCIÉTÉ ANONYME DU BULLETIN TECHNIQUE

A. STUCKY, ingénieur, président ; M. BRIDEL ; G. EPITAUX, architecte ; R. NEESER, ingénieur.

SOMMAIRE. — *Les constructions soudées. Le point de vue d'un constructeur après 25 ans de pratique*, par AUGUSTE CHEVALLEY, ingénieur. — *Contribution à l'étude des régulateurs de vitesse. Considérations sur le problème de la stabilité*. — *Société suisse des ingénieurs et des architectes : Communiqué du Secrétariat*. — *NÉCROLOGIE : Louis Chabloz, ingénieur*. — *BIBLIOGRAPHIE*. — *Avis à nos lecteurs*. — *RENSEIGNEMENTS DIVERS*. — *DOCUMENTATION*.

Les constructions soudées.

Le point de vue d'un constructeur après 25 ans de pratique,

par Auguste CHEVALLEY, ingénieur¹.

Messieurs,

Permettez-moi de venir ici collaborer bien modestement à vos travaux en vous exposant le point de vue d'un constructeur.

Il s'agit donc d'un constructeur de charpentes, de ponts et de chaudronneries soudés, et en premier lieu de soudure électrique à l'arc ; en effet, bien que les procédés de soudure dits autogène (au moyen des gaz) aient également fait des progrès depuis nombre d'années, il n'en reste pas moins vrai que dès son apparition, la soudure électrique à l'arc a fait preuve d'une telle supériorité qu'elle s'est imposée irrésistiblement.

Les installations pour la soudure électrique à l'arc ont commencé à faire leur apparition dans les ateliers de construction peu après la guerre 1914 à 1918 ; dès lors le domaine d'application de la soudure n'a fait que croître en importance. Les méthodes et le matériel du début ont fait place petit à petit à des procédés perfectionnés.

Les constructeurs ont donc déjà derrière eux une longue pratique de la soudure électrique à l'arc et j'essayerai de vous faire part des expériences faites, tout en vous montrant quelques ouvrages exécutés.²

¹ Conférence présentée à la « Journée de la soudure » organisée à Lausanne le 30 juin 1945 par l'Ecole d'ingénieurs et l'Association suisse pour l'essai des matériaux.

² L'exposé de M. Chevalley comportait en outre la description d'une série d'ouvrages, dont, faute de place, nous ne pouvons donner ici les photographies. Plusieurs d'entre eux sont du reste connus de nos lecteurs. (Réd.)

Que voulons-nous obtenir au moyen de la soudure électrique?

Nous ne voulons pas seulement remplacer la soudure que l'on peut obtenir à la forge en chauffant suffisamment les deux pièces à réunir, en découpant leur surface et en les pressant l'une contre l'autre, ou en les martelant, non, nous voulons obtenir un procédé d'assemblage général précis des pièces métalliques pour charpentes, ponts et chaudronnerie ; procédé qui soit supérieur aux anciens : rivetage ou boulonnage.

Pour cela examinons rapidement les matériaux, et en premier lieu les matériaux de base, j'entends par là précisément les fers et aciers de toutes nuances utilisés dans la construction.

Quand on pense à la complexité de composition du moindre acier où l'on trouve : 1° des corps simples ; 2° des combinaisons définies ; 3° des solutions solides ; 4° des agrégats, on se rend compte de la complexité d'un procédé d'assemblage qui ne doit pas seulement lier mécaniquement les différentes pièces d'un ensemble, mais en faire un seul tout homogène, où toutes les forces intérieures puissent se transmettre de molécules à molécules, de cristaux à cristaux, suivant des lignes de forces continues.

C'est le rôle des fabricants de métaux d'apport de fournir un matériel parfaitement adapté à chaque nuance d'acier ; les électrodes et l'enrobage protecteurs seront donc de composition telle que le résultat obtenu, le métal de la soudure terminée, soit aussi semblable que possible au métal de base.

Le rôle du constructeur se borne donc à choisir un métal parfaitement adapté à son but, de même qu'au choix des électrodes les plus parfaits. Les métaux de base les plus courants sont : *L'acier doux 37* ; l'acier 44 ; l'acier 50 ; ou les aciers à plus haute résistance encore ?

Au point de vue de la soudure, on peut utiliser toutes ces sortes d'acier, mais il est prudent dans les spécifications d'indiquer aux aciéries que le métal doit être facilement soudable par procédé à l'arc électrique ; dans ce cas on évitera

dans les aciers à haute résistance les éléments qui durcissent le métal ; on veillera spécialement à éliminer le silicium et à limiter la teneur en carbone.

Comme acier de construction à haute résistance, je vous signale un métal qui était déjà utilisé en très gros tonnages avant cette dernière guerre et que je considère comme devant remplacer l'acier doux 37 à 44 ou 50 pour tout ce qui nécessite une bonne résistance.

C'est l'acier au chrome-cuivre qui contient, en plus des éléments normaux de l'acier doux, environ 0,4-0,6 % de chrome et à peu près autant de cuivre. Cet acier a une limite élastique de 36 kg et une résistance de 52 à 60 kg avec des allongements de rupture considérables ; il est très tenace tout en étant facile à travailler ; il se soude parfaitement bien. Nous avons été, sauf erreur, les premiers constructeurs à demander aux Ateliers de Sécheron de bien vouloir étudier la fourniture d'une électrode correspondant à cette qualité d'acier. Cet acier présente encore une qualité précieuse : c'est d'être beaucoup moins sensible à l'oxydation que l'acier ordinaire¹.

Aussitôt après la guerre 14-18 sont apparus les premiers appareils de soudure et les premières électrodes. La société anglaise Quasi Arc mettait sur le marché des électrodes enrobées, formées d'une âme métallique et d'un enroulement en corde d'amiante, avec en plus un fil d'aluminium enroulé en spirale autour de l'âme. Les transformateurs de soudure étaient des appareils à courant continu, généralement des groupes rotatifs, qui étaient construits en Suisse mais pour le compte de la société Quasi Arc.

Les résistances des soudures étaient déjà remarquables, mais présentaient l'inconvénient de ne pouvoir être forgées ; au rouge les soudures se brisaient comme verre.

Bientôt apparurent les électrodes dont l'enrobage était formé d'une masse homogène obtenue en trempant les électrodes dans les cuves contenant l'enrobage semi-liquide. En même temps paraissaient les appareils de soudure utilisant le courant alternatif. Donc on pouvait avoir des groupes statiques plus simples et d'un entretien plus facile. L'inconvénient était leur facteur de puissance qui était très mauvais.

¹ Ici permettez-moi de faire une légère digression en faveur des aciers de construction à haute résistance.

Considérons des ouvrages qui rentreront dans la catégorie I des nouvelles prescriptions fédérales en préparation ; ce sont tous les ouvrages pour lesquels les charges sont peu variables, ou bien changent lentement, par exemple : les charpentes de bâtiment, les conduites forcées, les gazomètres.

Si nous désirons utiliser pour de tels ouvrages des aciers à haute résistance, il faut absolument changer une notion qui semblait jusqu'ici immuable, et qui est du reste fautive, celle de *sécurité*.

Pour les aciers à haute résistance, et tout spécialement l'acier au chrome-cuivre, limite élastique 36 kg/mm² environ, il me semblerait logique de remplacer la notion de *sécurité* par celle de *marge de sécurité*. En effet, le commun des mortels, quand on lui parle d'un ouvrage métallique dont la sécurité est 4, s'imaginerait que l'on pourrait faire travailler l'ouvrage sous des charges trois fois plus fortes et que la sécurité serait encore de 3/4. Dans ces conditions, on aurait depuis longtemps dépassé la limite élastique et l'ouvrage serait détruit ou rendu complètement inutilisable.

Imaginez par exemple une conduite forcée, construite en acier doux de 3,900 T/cm² de résistance, en admettant un taux de travail de 1,300 T/cm², donc de sécurité 3, nous aurons une marge entre le taux de travail effectif et la limite élastique d'environ 0,900 T/cm² (limite élastique 2,200 T/cm²).

Si nous prenons pour cette conduite l'acier au chrome-cuivre, résistance 5,700 T/cm², et que nous choisissons la même sécurité de 3, le taux de travail admissible sera seulement de 1,900 T/cm² ; mais la marge entre le taux de travail 1,900 T/cm² et la limite élastique de 3,600 T/cm², sera de 1,700 T/cm², alors que cette marge n'était que de 0,900 T/cm² avec l'acier ordinaire.

A mon avis, il n'y aurait aucun inconvénient à faire travailler la conduite en acier au chrome-cuivre à 2,5 T/cm² ou 2,6 T/cm², ce qui donnerait encore une marge de sécurité supérieure à celle de la conduite en acier doux.

Nous devons marcher résolument en avant et utiliser, sans timidité, toutes les possibilités que les métallurgistes remettront prochainement à notre disposition.

On adjoignit ensuite aux transformateurs de soudure des condensateurs pour améliorer le rendement. Très vite aussi des compositions d'enrobage, mieux étudiées, donnèrent un métal de soudure parfaitement forgeable. Dès l'apparition des appareils à courants alternatifs, les constructeurs entreprirent des essais comparatifs de soudure au courant continu et au courant alternatif. En effet, les rares renseignements que l'on pouvait obtenir à cette époque sur ces questions étaient pour la plupart faux.

Première expérience.

Je me rappelle que, pendant environ deux ans, chaque fois que nous avions à étudier la résistance de soudures, nous exécutions sur le même acier doux et avec les mêmes électrodes des éprouvettes soudées au courant continu et au courant alternatif.

Pour l'acier doux de construction et l'acier au chrome cuivre, *sans aucune exception*, les soudures exécutées au courant continu étaient bonnes, mais celles au courant alternatif étaient un peu supérieures.

Deuxième expérience.

Pendant quelques mois nous avons fait exécuter par des ouvriers expérimentés, par des ouvriers qui venaient de commencer de souder, par de jeunes apprentis qui tenaient une pince à électrodes depuis quelques jours seulement, des soudures sur un bout de tôle ; ensuite chaque tôle a été munie d'un numéro avec une initiale correspondant à l'exécutant du travail. Dans ces tôles, des éprouvettes ont été découpées et essayées. Le résultat remarquable a été celui-ci : Sur une trentaine d'éprouvettes dont les soudures étaient exécutées par des ouvriers qualifiés, par des ouvriers moins entraînés, par des apprentis, pas une éprouvette n'a donné moins de 42 kg/mm² de résistance. Les variations étaient infimes, soit de 42 à 43 kg/mm².

Cette expérience date d'une époque où tous les techniciens allaient répétant et disant : *votre soudure c'est très joli*, mais vous dépendez entièrement de l'habileté plus ou moins grande du soudeur. Ce qui était entièrement vrai pour la soudure aux gaz, n'était plus du tout vrai pour la soudure électrique. Avec la soudure aux gaz, il est possible d'obtenir une soudure d'aspect extérieur parfait, mais qui n'est qu'un simple collage sans aucune valeur ; avec la soudure électrique l'aspect extérieur renseigne bien sur la valeur de la soudure.

Il est toujours possible de faire un mauvais travail, mais ceci par une mauvaise disposition de la soudure, chanfreins insuffisants, mauvaise répartition des efforts, entailles extérieures ou intérieures, mais la soudure comme telle, si elle a bon aspect, sans porosités extérieures, est bonne.

S'il fut relativement facile de convaincre l'ensemble des personnes formant une maison de construction des énormes avantages économiques et techniques de la soudure électrique, il n'en était pas de même des administrations et des particuliers.

Je me rappelle encore l'époque où l'on introduisait subrepticement et quelques fois à l'insu des propriétaires, des parties de constructions soudées.

Sans vouloir faire un mauvais jeu de mot, il est positif que voyant pour la première fois les colonnes principales à treillis de la halle de laminage à Chippis, M. le Dr Angst s'est écrié : « Ah, si j'avais su qu'elles étaient soudées, je ne vous aurais jamais laissé faire ! ». C'était heureusement un peu tard pour revenir en arrière et je crois que personne ne l'a jamais regretté.

Et maintenant ces Messieurs des grandes écoles techniques et des laboratoires d'essais, sans vouloir les chicaner, il faut

avouer qu'ils ont fait une belle résistance ! pendant longtemps cette soudure ne leur disait rien qui vaille ; mais leur résistance a eu ceci de précieux que, la soudure remportant de grands succès, il a fallu faire machine arrière et se mettre d'autant plus sérieusement à l'étude du nouveau procédé.

On peut bien le dire, si l'on avait été aussi sceptique, et si la critique avait été aussi bien armée que maintenant, au moment où les procédés d'assemblage du métal par rivure faisaient leur apparition, jamais on aurait osé utiliser la rivure.

Pensez un peu, simplement, à toutes les excentricités qui se produisent dans l'attache d'un sommier ou d'un longeron quand on emploie des cornières d'attaches et des rivets. C'est quasiment catastrophique.

Donc les écoles et les laboratoires sont conquis, à part les exceptions, et je dirais même quelques fois trop conquis.

Les derniers nids de résistance contre la soudure, pour parler comme la mode actuelle, se trouvent encore dans les grandes administrations. Les Chemins de fer fédéraux (C. F. F.) sont presque conquis, à part quelques exceptions notables.

Ce que je disais à M. l'ingénieur en chef des C. F. F., il y a de nombreuses années, à propos d'un grand pont de chemin de fer, où seulement certains assemblages ont été soudés, reste encore vrai dans plusieurs cas.

Je disais à peu près ceci : « Vous C. F. F., vous êtes vraiment curieux. Vous dites que pour les ponts de chemin de fer la soudure ne peut pas être utilisée, surtout au montage. Mais dans des assemblages principaux et fortement sollicités aux choes, quand les concentrations d'efforts sont telles qu'il n'y a plus assez d'espace pour placer des rivets, vous utilisez la soudure ».

Je désire maintenant vous communiquer le résultat d'expériences d'un constructeur et voir où nous en sommes, ceci sans empiéter dans le domaine de mes savants collègues qui vous exposeront par le détail la métallurgie des soudures, les calculs et coefficients admissibles.

Ce qui frappe toujours comme constructeur c'est de constater combien on a de peine à se défaire des anciennes méthodes.

En construction chevillée, (j'entends par là rivure, boulons, vis, etc.) il était logique et de toute nécessité de superposer des surfaces, de les serrer fortement pour les rendre solidaires par frottement et ensuite seulement, en dernier ressort, pouvoir compter encore sur le cisaillement des chevilles.

En construction soudée il faut au contraire proscrire de tels procédés et faire travailler toutes les soudures aux efforts directs sans aucune interruption de matière extérieure ou intérieure.

Principe n° 1.

Tout ouvrage soudé devrait présenter un ensemble absolument compact, sans aucune superposition de pièce, sans aucune faille intérieure ou extérieure, comme une bonne pièce d'acier coulé sortant de son moule.

Vous me direz : ceci est très difficile et couteux à réaliser, eh bien, l'expérience prouve justement le contraire. Cette expérience se vérifie quels que soient les coefficients adoptés pour la résistance des soudures par rapport à la résistance du métal de base.

Toute construction métallique peut se ramener à un assemblage de plats plus ou moins larges et plus ou moins épais. Pour les joints transversaux de ces fers plats, faites des soudures directes bout à bout, avec soudure à cœur par des chanfreins appropriés. Pour les liaisons latérales de plats parallèles, soudez également à cœur avec chanfreins. Comment réaliser cet assemblage en forme de té des deux plats ?

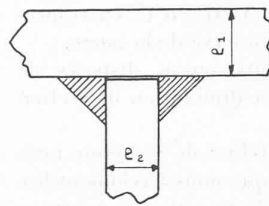


Fig. 1. — Méthode I.

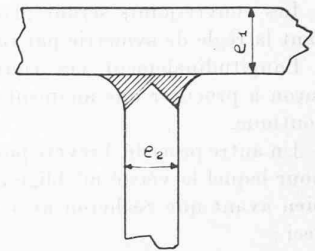


Fig. 2. — Méthode II.

On réalise souvent cet assemblage suivant la méthode I (fig. 1), par deux soudures d'angle latérales qui laissent une interruption ou une faille intérieure approximativement de largeur e_2 entre les deux pièces à réunir.

Cet assemblage est faux, tant au point de vue technique qu'au point de vue économique. Il est facile de prouver que l'assemblage II (fig. 2.), est préférable à tous les points de vue.

On prouve facilement que le volume de soudure dans la deuxième méthode est beaucoup moindre que dans la première et que cette différence de volume, et par conséquent de travail, compense largement le travail de chanfreinage de la pièce.

Au point de vue technique les tensions et les déformations seront très faibles dans la deuxième méthode, et beaucoup plus considérables dans la première. (Nous aborderons tout à l'heure la question des tensions dues à la soudure.)

Deuxième principe découlant du premier.

Les soudures ne seront jamais calculées d'après les efforts, mais seront calculées de manière à obtenir l'équivalence avec la section du métal de base non soudé.

Les barres et les sections nécessaires du métal de base seront calculées, et automatiquement la soudure sera déterminée.

Exemple : Liaison entre l'âme et la semelle d'une pièce fléchie. Il peut arriver que le cisaillement entre l'âme et la semelle soit relativement très faible par rapport à la section de l'âme. Supposons une âme de 12 mm et que le taux de cisaillement soit de 400 kg par cm courant de poutre, ce serait une faute que de prévoir seulement la soudure pour cet effort. Il faut au contraire que la soudure soit l'équivalent de l'âme.

Remarque de nouveau que ce principe peut s'appliquer quel que soit le coefficient de réduction adopté pour la résistance du métal des soudures par rapport à celui du métal de base.

Exemple : Nous avons à exécuter un joint soudé d'une pièce en forme de la lettre H (fig. 3), la résistance des soudures bout à bout est adoptée 0,9 de la résistance du métal de base. Vous soudez donc bout à bout et à cœur les trois plats qui forment la section. Pour la résistance manquante, il vous sera facile de prévoir une section complémentaire, sous forme de petits couvre-joints mais qui, eux aussi, respecterons la règle de la construction compacte.

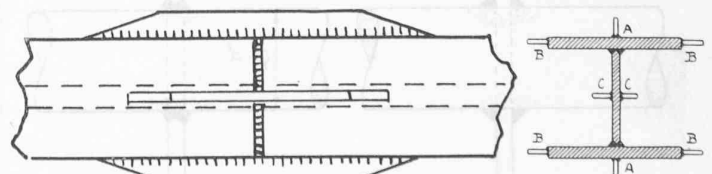


Fig. 3. — Vue longitudinale et coupe d'un joint soudé d'une pièce en forme de H.

Les couvre-joints seront placés en A, B, ou C, en respectant la règle de symétrie par rapport à l'axe de la barre.

Longitudinalement ces couvre-joints seront disposés de façon à procurer une augmentation et diminution de section continue.

Un autre procédé, breveté par les Ateliers de Sécheron, mais pour lequel la vérité m'oblige à dire que nous l'avons utilisé bien avant que Sécheron ne songe à le breveter, consiste en ceci :

La section de soudure d'un fer plat élémentaire déborde l'extérieur des chanfreins et augmente la section de soudure par rapport à celle du métal de base, dans une proportion inverse à celle de la réduction de résistance admise (fig. 4). C'est en somme le procédé utilisé par la nature pour obtenir d'un os fracturé une résistance plus grande qu'avant l'accident.

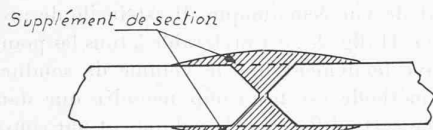


Fig. 4.

Troisième principe.

L'expérience prouve que des soudures faites selon toutes les règles, avec les électrodes appropriées, donnent un métal des soudures équivalent au métal de base à tous les points de vue. Donc résistance, pliage, allongement, fatigue.

S'il n'y avait pas une très grave condition, indispensable pour obtenir ce résultat, il n'y aurait plus de question de la soudure et notre réunion d'aujourd'hui deviendrait sans objet.

Cette condition, à mon sens essentielle, et qu'il n'est pas toujours facile de réaliser, c'est de permettre le retrait de se produire librement dans le sens perpendiculaire à la soudure.

Prenez deux pièces de tôle, posées librement sur la table de soudage ; après avoir pointé les deux pièces à réunir, vous mesurez très exactement la distance entre deux repères situés de part et d'autre de la soudure, sur une ligne perpendiculaire au joint. Après avoir terminé la soudure vous constaterez que les deux repères ne sont plus à la même distance, mais se sont rapprochés d'environ $1/10$ de l'épaisseur des pièces. Nous avons trouvé que, pour presque toutes les épaisseurs courantes, cette règle se vérifie.

Si dans un ouvrage quelconque ce retrait est entravé complètement, vous provoquerez dans l'ouvrage des tensions considérables et qui conduiront tôt ou tard à des ruptures.

L'expérience classique qui donne la preuve de ce que j'affirme est celle-ci. Sur un arbre d'un certain diamètre vous soudez une collerette de la manière suivante (fig. 5 et 6) :

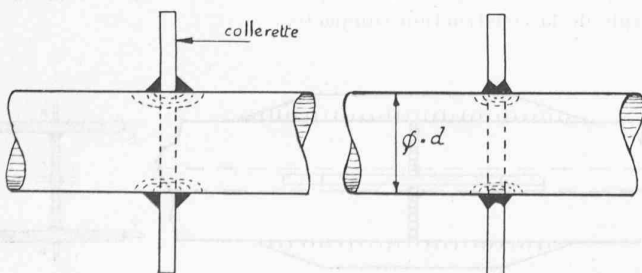


Fig. 5.

Fig. 6.

L'expérience prouve qu'un tel arbre, soudé à la température ordinaire, casse toujours sans aucune déformation. Ceci s'explique parfaitement. La partie extérieure de l'arbre ne peut absolument pas subir de retrait, ce retrait est complètement empêché par la masse intérieure de l'arbre qui n'est pas influencée par la soudure. De très fortes tensions se produisent dans la zone extérieure qui provoquent la rupture à plus ou moins bref délai. Je dit bien un tel assemblage saute sans exception. Les soudures agissent vraiment comme si l'arbre avait une entaille. Je vous citerai l'exemple de deux arbres d'alternateurs, ayant environ 600 mm de diamètre, sur lesquels on avait soudé une bague relativement peu importante. L'un des arbres a sauté brusquement après une année de service, l'autre a été cassé net aux essais. Je pourrais vous citer une multitude d'autres exemples.

M. le professeur A. Dumas pense que l'on peut parfaitement exécuter un tel assemblage en chauffant l'arbre au préalable avant de souder ; c'est un remède peu sûr. Dans un atelier vous n'aurez pas constamment une surveillance suffisante et un physicien pour contrôler la température de votre arbre. Non, le seul remède dans ce cas c'est le recuit à 680 ou 700 degrés. Nous en reparlerons plus loin.

Enfin, l'expérience d'atelier montre que si les soudures ne sont pas exécutées dans l'ordre voulu, pour permettre le retrait de se produire, on peut avoir des ruptures stupéfiantes. Ainsi, dans une grande pièce de chaudronnerie formant une sorte de tube de section rectangulaire, avec angles arrondis, un simple coup de pointeau provoque une rupture de 2 m de longueur en pleine tôle de 15 mm d'épaisseur. La rupture s'est faite suivant une ligne diagonale, en pleine tôle, les joints soudés n'ont pas été touchés par la rupture. La tension intérieure devait être de l'ordre de 1200 tonnes.

Il est évident que si l'on découpe, dans un ouvrage comportant de fortes tensions intérieures, une éprouvette en travers d'une soudure, on ne trouve rien du tout, parce que précisément ces tensions intérieures sont annulées, débridées, par le découpage de l'éprouvette.

Un autre exemple du retrait qui se produit dans les soudures a été nettement constaté lors de la construction d'un bateau destiné au transport du sable et du gravier. Le bateau était construit à l'atelier en tranches transversales, à la manière dont on découpe un saucisson. Une fois assemblé au chantier de montage, la longueur du bateau correspondait aux plans, mais après avoir soudé tranche après tranche, la coque s'est raccourcie d'environ 36 mm soit environ $1/1000$ de la longueur totale.

L'application du troisième principe de construction n'est certes pas toujours facile à réaliser.

Imaginez que l'on ait à construire une poutre pleine de grande hauteur. Dans cette poutre se trouveront des joints d'atelier et des joints de montage. Généralement dans chaque tronçon d'atelier, on commencera les soudures au centre de la pièce pour les poursuivre symétriquement en avançant vers les extrémités. Mais comment exécuter la soudure d'un joint transversal ? Si vous soudez en premier lieu les ailes de la poutre, vous aurez très probablement de fortes tensions au moment où vous soudez l'âme. Il vaut mieux, je crois, dans ce cas souder l'âme qui est plus élastique en premier, et ensuite symétriquement les ailes. De toutes façons, dans ce cas il sera bien difficile d'éviter les tensions intérieures.

C'est ce qui m'a fait conclure depuis fort longtemps qu'il est plus facile de réaliser une poutre à treillis soudée plutôt qu'une poutre à âme pleine, ceci au point de vue des tensions internes et en définitive de la sécurité de l'ouvrage.

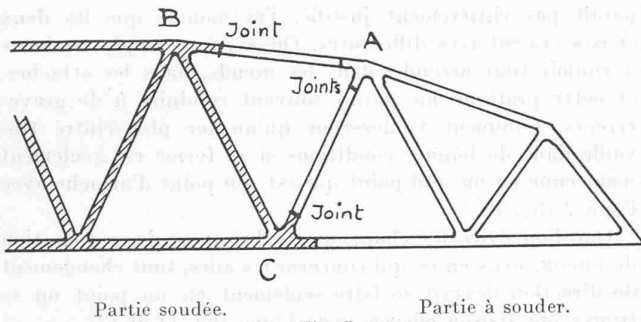


Fig. 7.

En effet, supposez que l'on ait soudé déjà une partie d'une poutre principale à treillis, par exemple celle de gauche de la figure 7. Le prochain nœud à réunir à la partie déjà terminée est le nœud A.

La position dans l'espace de ce nœud est déterminée par les longueurs définitives, après retrait des joints soudés des barres AB et AC. Rien n'empêche le nœud A de prendre sa position, sans qu'il se produise pour ainsi dire aucune tension intérieure. Il faut donc toujours ajouter de nouveaux éléments à la partie terminée dans l'ordre voulu. On tiendra compte du retrait des joints dans le schéma général de la poutre.

Au pont sur le Rhône à Granges, les tronçons des poutres principales pleines étaient de 23 m de longueur environ; il y avait pour chaque poutre principale deux joints de 2 m de hauteur à souder sur place. Voici comment on a procédé (fig. 8 et 9).

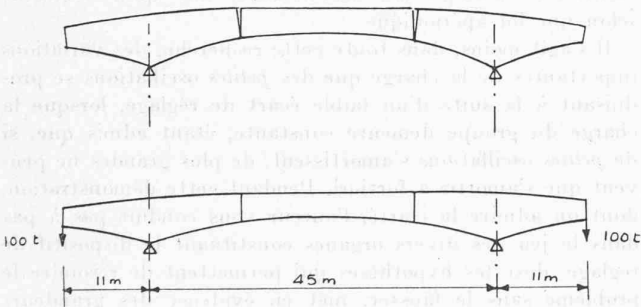


Fig. 8 et 9.

On a placé le pont sur son échafaudage en lui donnant une forme plus cintrée que la forme définitive.

Les deux joints étaient donc ouverts en forme de triangle. On a commencé par souder l'aile inférieure, ensuite l'âme en montant depuis l'aile inférieure; les deux joints se fermaient petit à petit et en même temps les vérins à vis de l'échafaudage permettaient de suivre ce mouvement en diminuant la contreflèche. Quand l'aile supérieure était entièrement soudée le mouvement de fermeture était terminé et on obtint la forme définitive prévue. Il va sans dire que les tensions intérieures ne sont pas annulées par ce procédé, mais elles sont tout au moins bien atténuées.

Evidemment, il faut combattre les tensions intérieures par un ordre rigoureux d'exécution des soudures, par le choix d'un métal tenace, ductile, capable de supporter des déformations si c'est indispensable, mais le remède le meilleur consisterait à recuire les pièces terminées en atelier.

Le recuit serait nécessaire pour les pièces de pont compliquées où précisément le retrait transversal des soudures peut être entravé.

On pourrait imaginer qu'à l'avenir on pourra disposer dans le sol des ateliers de construction de très longs fours chauffables électriquement, par sections, suivant les longueurs des membrures ou pièces de pont à recuire.

Comme la température de 670 à 700° serait suffisante, il ne serait probablement pas nécessaire de chauffer le sol de ces fours, ce qui présente de gros inconvénients; il suffirait probablement de prévoir un chauffage des parois latérales et des couvercles, avec une très bonne isolation du fond.

De ce qui précède faut-il conclure que les joints de montage soudés doivent être évités? Ce n'est pas du tout mon avis, mais il faut encore plus qu'en atelier étudier la succession des opérations de soudure et prévoir éventuellement en ces points un supplément de résistance.

Avant de terminer, je désire encore faire quelques remarques sur les essais de fatigue des constructions soudées.

Il est maintenant de mode de donner je crois une importance exagérée aux essais de fatigue; certes ces essais sont précieux pour établir des comparaisons entre diverses soudures et le métal de base. Mais il faut se rappeler que les variations d'efforts généralement d'allure sinusoïdale que l'on produit sur une machine d'essai, n'ont aucun rapport avec ce qui se passe dans la réalité d'une construction d'un pont de chemin de fer par exemple. En un point donné d'une barre, le passage d'un train provoque une variation de tension depuis celle qui est due à la charge morte. La tension provoquée par le passage d'un train peut être représentée par une courbe en plaçant le temps en abscisse et les tensions en ordonnées. Cette courbe aura un maximum ou plusieurs suivant qu'il s'agit de membrures ou de diagonales. Il ne faut pas oublier que les vibrations se produiront en plus et en moins de cette courbe. Les vibrations avec l'effort maximum seront donc en relativement petit nombre par rapport au nombre de vibrations total.

Les conditions sont toutes différentes sur une machine d'essai où la tension choisie est une constante. Sur une machine aussi les vibrations sont produites sans interruptions; en réalité pour un ouvrage en service, de longs espaces de temps se produisent entre les périodes de vibration.

On a maintenant la tendance d'appliquer aux constructions des formes qui résultent des essais à la fatigue, cela ne me

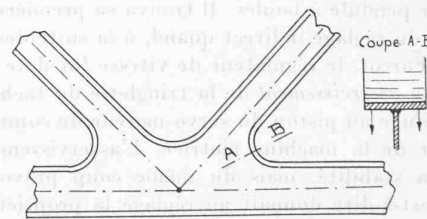


Fig. 10.

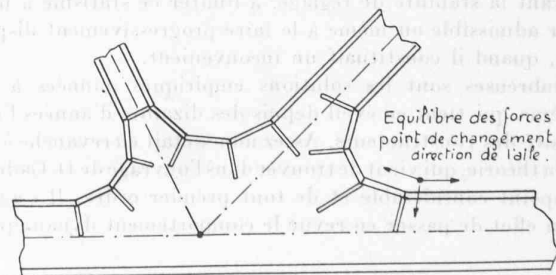


Fig. 11. — Poutre à treillis.

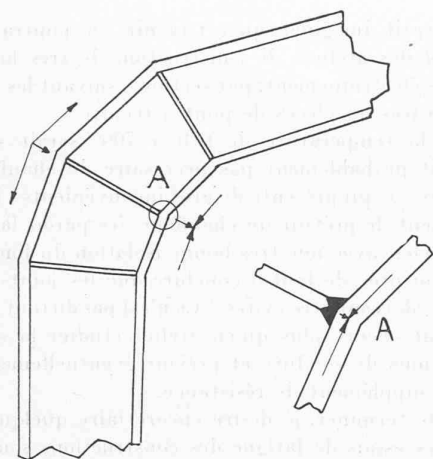


Fig. 12.

paraît pas entièrement justifié, j'ai montré que les deux choses étaient très différentes. On a par exemple tendance à vouloir tout arrondir dans les nœuds, dans les attaches, et cette pratique me paraît souvent conduire à de graves erreurs. Comment voulez-vous qu'un fer plat cintré travaille dans de bonnes conditions si sa forme est seulement maintenue en un seul point qui est son point d'attache avec l'âme ? (fig. 10).

Que l'on évite les changements brusques de section, rien de mieux, mais en ce qui concerne les ailes, tout changement de direction devrait se faire seulement en un point où se trouve une liaison efficace avec l'âme (fig. 11 et 12).

Je laisserai pour la journée de discussion qui aura lieu en automne, plusieurs questions qu'il serait intéressant d'examiner, par exemple la question des raidissements de toutes les surfaces en tôle et tout spécialement des constructions navales.

Contribution à l'étude des régulateurs de vitesse

Considérations sur le problème de la stabilité

par Daniel Gaden, ingénieur,
directeur des Ateliers des Charmilles, Genève¹.

L'Ecole d'Ingénieurs de Lausanne vient de recevoir en hommage un ouvrage qui lui fait honneur, provenant d'un des meilleurs, parmi ses anciens élèves. Le « Bulletin Technique » est heureux de pouvoir s'associer à cette manifestation en donnant de ce volume remarquable le compte rendu qu'on va lire (Réd.).

Le problème de la stabilité dont il s'agit est principalement — l'auteur prend soin de le préciser — celui de la marche d'une turbine hydraulique, munie d'un régulateur automatique de vitesse; mais diverses considérations qu'il expose s'étendent au cas de n'importe quelle machine motrice et donnent à l'ouvrage une portée générale qui déborde dans tout le domaine du réglage des centrales génératrices d'un réseau d'énergie électrique.

Le problème date du jour où Watt, vers 1784, construisit son premier pendule à boules. Il trouva sa première solution dans le cas du réglage indirect quand, à la suite des travaux de Joseph Farcot, le régulateur de vitesse fut doté par Paul Piccard d'un asservissement de la tringlerie du tachymètre à force centrifuge au piston du servo-moteur de commande du distributeur de la machine motrice. L'asservissement assurait bien la stabilité, mais du même coup provoquait un *statisme*, c'est-à-dire donnait au réglage la propriété parfois gênante de faire tourner la machine plus vite en marche à vide qu'à pleine charge. Il a dès lors fallu chercher, tout en réservant la stabilité de réglage, à limiter ce statisme à une valeur admissible ou même à le faire progressivement disparaître, quand il constituait un inconvénient.

Nombreuses sont les solutions empiriques données à ce problème qui tient en éveil depuis des dizaines d'années l'ingéniosité des constructeurs. Assez mince était en revanche à ce sujet la théorie, qui vient de trouver dans l'ouvrage de D. Gaden, un appont considérable et de tout premier ordre. Il s'agissait en effet de passer en revue le comportement dynamique,

non seulement du régulateur à simple tachymètre avec asservissement permanent ou temporaire, mais aussi le régulateur accéléro-tachymétrique dont on sait la sensibilité et la rapidité de réglage avec lesquelles il est à même d'agir.

Les trois premiers chapitres de l'ouvrage fixent les définitions, les phases successives du réglage, établissent les équations principales du mouvement du régulateur et du mouvement des masses tournantes du groupe, pour finalement intégrer le système d'équations différentielles simultanées et établir les conditions dans lesquelles, pour chaque cas, le mouvement de réglage est *amorti*, c'est-à-dire sa stabilité est assurée, soit que ce mouvement comporte des oscillations d'amplitude décroissante, soit qu'il s'effectue selon une loi apériodique.

Il s'agit moins, dans toute cette recherche, des variations importantes de la charge que des *petites* oscillations se produisant à la suite d'un faible écart de réglage, lorsque la charge du groupe demeure constante, étant admis que, si de *petites* oscillations s'amortissent, de plus grandes ne peuvent que s'amortir a fortiori. Pendant cette démonstration, dont on admire la clarté, l'auteur vous conduit pas à pas dans le jeu des divers organes constituant le dispositif de réglage, dose les hypothèses qui permettent de résoudre le problème sans le fausser, met en évidence des grandeurs caractéristiques qui groupent en elles-mêmes toutes les données essentielles du problème. L'appareil mathématique mis en jeu à ce propos permet entre autres de montrer comment, *au point de vue de la stabilité* du réglage, le jeu de l'accéléromètre est l'équivalent de l'asservissement permanent ou temporaire d'un régulateur à simple tachymètre, à cette différence près toutefois que l'accéléromètre réagit directement à l'effet de l'accélération, tandis que l'effet d'un asservissement ne se fait sentir qu'indirectement; il va de soi qu'en cas de variation de la charge (ce qui ne constitue plus le problème de la stabilité) le jeu de l'accéléromètre est tout différent de celui du tachymètre et autrement avantageux que ce dernier, puisqu'il n'a pas à attendre, pour réagir, un écart de vitesse suffisant.

Le lecteur appréciera sans doute l'introduction de termes nouveaux pour définir, non seulement qualitativement, mais quantitativement des « temps » typiques; ainsi

la promptitude du réglage, qui détermine la vitesse de variation de la puissance produite à laquelle le réglage peut satisfaire, lorsqu'il est sollicité par un très faible écart de vitesse ou par une faible accélération;

¹ 1 vol. 253 pages, 32 figures. — Editions La Concorde, Lausanne 1945, broché Fr. 21.—, relié Fr. 27.—.