

LE PROBLÈME SCIENTIFIQUE DES ASSEMBLAGES SOUDÉS

par F. CAMPUS

Recteur de l'Université de Liège

Résumé. — *Le problème des assemblages soudés est un problème de connexion particulièrement difficile. Les éléments principaux d'un tel problème sont les déformations et les tensions. Leur étude mathématique est pratiquement inexistante. La méthode expérimentale semble actuellement la plus efficace. Quelques formules déduites de recherches expérimentales sur le retrait global des joints soudés bout à bout sont présentées. Les questions de la soudabilité et des ruptures fragiles sont à considérer aussi sous l'angle du problème de connexion.*

On distingue volontiers dans la science objective (ou philosophie naturelle) trois états : la connaissance, l'explication et la prévision. Je les énonce dans l'ordre qui semble naturel à première vue. En fait, cet ordre de succession n'a rien d'absolu, mais il satisfait généralement les esprits systématiques pour ce qui concerne les sciences évoluées au point d'être quasi accomplies. Il est banal de faire observer que les Anciens d'Asie Mineure, sans vraie connaissance et davantage encore sans explication de l'univers sidéral, pouvaient cependant prévoir certains phénomènes astronomiques. Actuellement, l'avancement de toutes les sciences n'est pas encore tel que les trois états énoncés ci-dessus soient atteints ou le soient dans l'ordre énoncé. Il est arrivé que l'explication ou l'hypothèse ait permis la prévision avant la connais-

sance, c'est-à-dire avant l'observation, comme en relativité et en physique moderne.

La rapidité du développement technologique et industriel a engendré très fréquemment les mêmes apparences d'anomalies dans les sciences appliquées, que j'appellerai de la sorte pour les distinguer des autres sciences, non parce que les premières soient seules susceptibles d'application, mais parce qu'elles sont issues de problèmes de la pratique technologique et industrielle.

Le caractère le plus véritable des sciences appliquées est en effet qu'elles sont généralement déphasées par rapport à l'application, surtout pour les plus complexes, au nombre desquelles figure celle des assemblages soudés. L'application implique une prévision, alors que la connaissance et l'explication peuvent encore être très imparfaites. Il peut arriver d'ailleurs que la prévision se révèle aussi défectueuse. On en connaît des exemples notables et encore récents dans divers domaines de la construction soudée.

La pression économique ne permet généralement pas à la technologie et à l'industrie d'attendre la connaissance et l'explication scientifiques des phénomènes en cause. L'avancement scientifique peut être lent par rapport au développement technique. Après plus d'un siècle de béton et de béton armé, dont les réalisations innombrables et souvent gigantesques caractérisent des procédés assurés et normalisés, leur connaissance scientifique est encore incomplète

et la loi de durcissement des conglomerats hydrauliques est à son aurore.

Ces remarques permettent de comprendre qu'à l'origine, une science, particulièrement une science appliquée, peut se trouver dans une situation indécise, malaisée, où elle cherche sa voie et essaye de se formuler. Cet état, qui peut être antérieur aux trois, précédemment énoncés, de connaissance, d'explication et de prévision, mais qui est susceptible aussi de les accompagner, a été le mieux défini comme suit par Paul Claudel : « L'interrogation est le don socratique de poser des questions justes. Nous n'avons pas seulement à connaître la vérité, mais à la provoquer. Toute question correctement posée sollicite une réponse. Le savant est un homme qui pose des questions justes ». Je n'oserais affirmer que le poète ne prétende pas enfermer dans ces sentences la définition complète de la science et je ne voudrais pas disputer sur ce point.

Mais, m'en tenant à mon sujet, je crois ne pas m'aventurer en considérant que la science des assemblages soudés en est encore à poser des questions. Dans des publications antérieures, j'ai constaté que les questions posées n'étaient pas toujours des questions justes. Dans les mêmes publications, j'ai tenté de dégager diverses directives et d'en approfondir quelques-unes. J'essayerai dans cette communication de faire une synthèse du problème scientifique des assemblages soudés. C'est littéralement ce que l'on a appelé récemment un problème de connexion. Un tel problème n'est pas exclusif aux constructions soudées. Il existe dans tous les modes de construction et dans maints d'entre eux, il est à l'ordre du jour. Dans des leçons récentes à la Faculté des Sciences appliquées de l'Université de Liège, M. P. Lardy, professeur à l'École polytechnique fédérale de Zurich, a fait un exposé très complet des méthodes mathématiques générales de résolution de ce genre de problème dans le domaine de l'élasticité. Il a montré par l'analyse du cas relativement simple de la connexion du barrage triangulaire à gravité et du sol de fondation, à quel travail mathématique et de calcul numérique réellement énorme on est conduit, durant six mois d'activité ininterrompue ou davantage. Et cependant, la solution obtenue ne peut être encore considérée comme exacte, car elle sort en réalité du domaine limité de l'élasticité qui la conditionne ; elle n'est pas apte non plus à tenir compte du retrait du béton et du dégagement de la chaleur de durcissement du ciment.

Le professeur P. Lardy a, dans une autre leçon, rappelé aussi l'importance déjà connue des problèmes de connexion pour les ouvrages hyperstatiques en béton précontraint et indiqué, par un exemple concret, la gravité des consé-

quences que peut entraîner l'omission des effets de la précontrainte sur les connexions.

On voit par là que la construction soudée se trouve confrontée avec des problèmes de même caractère que les autres procédés de construction les plus modernes. Seulement, du point de vue scientifique, comme d'ailleurs du point de vue pratique, les difficultés sont sensiblement plus grandes pour les constructions soudées.

Les problèmes de connexion sont résolus par ce que l'on appelle généralement les conditions ou équations de compatibilité, c'est-à-dire que les déformations et les tensions qui y correspondent ne donnent lieu à aucune discontinuité dans la connexion. Comme M. le professeur Lardy l'a exprimé d'une manière très suggestive, cela revient à dire que si l'on considère une section fictive dans la connexion, les tensions et les déformations des deux parties de la construction séparées par cette section idéale sont telles que les deux parties s'adaptent suivant cette section d'une manière exacte, sans recouvrement ni vide. Il s'agit là de la conception mathématique ou mécanique du problème, mais concrètement les vides dans une connexion soudée peuvent se manifester sous forme de fissures, voire de ruptures.

D'autre part, le problème de connexion doit être envisagé dans les conditions où il se présente, c'est-à-dire en considérant tous les facteurs qui ont une influence notable sur la solution. L'intervention inéluctable de phénomènes thermiques, aux conséquences multiples, rend particulièrement compliquée la solution des problèmes de connexion des assemblages soudés. Ce n'est qu'au prix de prestations mathématiques auxquelles répugneraient même les plus férus du calcul, que l'on peut aborder des cas idéalement simplifiés à ce point que leur solution n'a guère de signification. La plupart des cas sont d'une difficulté qui prend encore les mathématiques en défaut et relèvent de ce fait de la méthode expérimentale.

Déformations et tensions sont donc les inconnues du problème scientifique des assemblages soudés. Cela n'est pas encore généralement admis, je pense. D'autre part, la confusion de ces deux éléments, anciennement fréquente, comme je l'ai signalé dans des publications antérieures, se trouve encore actuellement, même dans des publications présentées par les laboratoires de recherche de firmes d'importance mondiale et sous les auspices de commissions internationales. Ce sont là des difficultés inhérentes aux débuts de toute science appliquée.

Les tentatives mathématiques d'aborder le problème ne sont pas nombreuses à ma connaissance. La plus récente me paraît être celle du professeur Takeo Naka, de Tokyo (1).

L'étude concerne la soudure bout à bout d'un barreau de longueur infinie et de section transversale assez faible pour que le problème puisse être considéré comme unidimensionnel. L'équation de la conductibilité de la chaleur permet d'établir la variation de la température de la barre en fonction du temps (depuis le commencement de la soudure) et de la distance à l'axe du joint, en adoptant toutefois des valeurs moyennes constantes des coefficients thermiques. Selon l'auteur, la concordance avec les résultats expérimentaux est satisfaisante. Des problèmes analogues ont déjà été traités avec succès, notamment par M. D. Rosenthal, au II^e Congrès national des Sciences, à Bruxelles en 1935.

Le passage aux déformations et aux tensions, c'est-à-dire aux éléments réels du problème, laisse beaucoup plus à désirer. Le problème étant traité comme unidimensionnel, il ne peut être question d'analyser la répartition des déformations transversales et longitudinales par rapport au joint soudé (2), bien que M. Takeo Naka se réfère à des barreaux de 10 cm de largeur, dimension des éprouvettes normales de mes essais.

Finalement, M. Takeo Naka aboutit à la formule suivante du retrait global linéaire moyen :

$$\rho_m = \frac{q \alpha T}{c \Delta} = \frac{\alpha Q T}{c \Delta S_b} = \frac{\alpha Q L_m^j S_j}{c v S_b}$$

Les paramètres de cette formule sont :

ρ_m = retrait linéaire moyen.

Q = quantité de chaleur communiquée par unité de temps au joint soudé.

$$q = \frac{Q}{S_b}$$

S_b = section du barreau = $l \times e$ (l = longueur du joint ; e = épaisseur du barreau).

T = durée de la soudure sans interruption.

α = coefficient de dilatation thermique.

c = chaleur spécifique.

Δ = poids spécifique.

S_j = section du joint dans le sens transversal du barreau (c'est-à-dire de la longueur du joint).

L_m^j = largeur moyenne du joint (le volume du joint est $V = S_j \times L_m^j$).

$$v = \text{vitesse de soudure} = \frac{\Delta V}{T} = \frac{\Delta S_j L_m^j}{T}$$

(poids de soudure déposé par unité de temps)

Cette formule est identique à la formule sommaire de Wörtmann et Mohr (1932) :

$$\rho_m = \frac{\alpha p k}{c \Delta e}$$

Dans laquelle :

p = poids de soudure par unité de longueur du joint.

$$\left(p = \frac{\Delta V}{l} = \frac{\Delta S_j L_m^j}{l} \right)$$

k = quantité de chaleur par unité de poids de soudure $\left(k = \frac{Q}{v} \right)$.

On vérifie facilement l'identité des deux formules.

J'ai montré antérieurement l'insuffisance de cette formule et d'autres analogues (2). Cependant il se fait précisément que pour la valeur de $l = 10$ cm, à laquelle se réfère M. Takeo Naka et qui était celle de mes éprouvettes normales, les résultats expérimentaux cadrent assez bien avec les valeurs tirées des formules.

Je n'ai pas ici l'occasion de développer ce point, mais il faut bien reconnaître que cette étude mathématique, qui fait cependant appel pour sa solution à des fonctions transcendantes et à des intégrations complexes, conduit à un résultat sommaire et à une analyse tout à fait incomplète, même en ce qui concerne le retrait global. Quant aux déformations ponctuelles, elle ne les considère même pas. Cela équivaut à un échec de la méthode mathématique.

Sur la base des essais partiellement relatés dans un ouvrage antérieur (2) et poursuivis depuis lors, j'ai exposé au cours de mes leçons de Chaire Francqui à l'Université libre de Bruxelles, en février 1952, les formules inédites suivantes :

1) Pour les joints bout à bout en X de 150 mm de longueur :

$$\rho_m = \frac{4 L_m^c}{10,85 + L_m^c} \quad (\text{en mm})$$

pour $5 < L_m^c < 35$ mm.

L_m^c est la largeur moyenne du chanfrein (joint soudé théorique selon le dessin).

2) Pour les joints bout à bout en V de 150 mm de longueur :

$$\rho_m = 0,18 L_m^c \quad (\text{mm}) \quad \text{pour } 15 < L_m^c < 35 \text{ mm}$$

ou :

$$\rho_m = \left[0,18 + \frac{(30 - e)^2}{22.500} \right] L_m^c \quad (\text{mm})$$

pour $5 < L_m^c < 15$ mm et $35 < L_m^c < 65$ mm, e étant l'épaisseur en mm des pièces assemblées. Ce sont là des expressions très simples de première approximation ; leur ajustement aux résultats expérimentaux se heurte à la dispersion assez considérable, inévitable dans de telles expériences. L'influence de la longueur du joint

peut être représentée selon la formule suivante (3) :

$$\rho_{ml} = \rho_{m150} + 0,091 \left(\log \frac{l}{150} \right) L^c_m \quad (\text{en mm})$$

où :

ρ_{ml} est le retrait moyen du joint de longueur l (mm).

ρ_{m150} le retrait moyen du joint de 150 mm de longueur.

(selon les formules ci-dessus).

Les logarithmes sont vulgaires. On a objecté à cette formule que ρ_{ml} tendait vers l'infini en même temps que l . Cette objection n'a pas beaucoup d'importance, car le domaine de validité de la formule d'après les expériences dont elle a été déduite, est défini par :

$$10 < l < 2000 \text{ mm}$$

Cependant, pour écarter cette objection, on peut avec la même approximation recourir à la formule :

$$\rho_{ml} = \rho_{m150} \times \frac{1,556}{1 + \frac{15,7}{l^{2/3}}} \quad (\text{en fonction du mm})$$

Les formules précédentes sont valables dans un domaine assez étendu :

$5 < e < 75$ mm pour l'épaisseur.

$60^\circ < \varphi < 90^\circ$ pour l'ouverture angulaire du chanfrein.

$1 < x < 4,5$ mm pour la largeur minimum du chanfrein.

$10 < l < 2000$ mm pour la longueur du joint.

Pour la longueur du joint, il semble que l'on puisse extrapoler avec une bonne approximation au-delà de $l = 2000$ mm. Il y a cependant lieu de faire toutes réserves au sujet de la valeur limite $\rho_{m\infty} = \rho_{m150} \times 1,556$, qui n'est nullement établie par voie expérimentale.

Tels sont les résultats de l'étude expérimentale en ce qui concerne le retrait linéaire global moyen. La répartition des déformations locales est complexe (2). Il en est de même des tensions résiduelles directes de soudure au voisinage du joint, dont l'étude mathématique devrait recourir à l'analyse bidimensionnelle et serait nécessairement assez hypothétique. L'étude unidimensionnelle du Professeur Takeo Naka ne la permet pas, mais il aborde le problème des tensions indirectes ou de bridage par la formule :

$$\sigma_s = \rho'_m \frac{R}{S_j}$$

dans laquelle σ_s est la tension dans la soudure, ρ'_m est le retrait que l'on constaterait entre les

sections d'encastrement lors de la libération de la pièce bridée et R est la force nécessaire pour produire un allongement élastique égal à l'unité de longueur dans la pièce sur la distance entre les deux sections d'encastrement. L'auteur écrit que cette tension doit être inférieure à la limite élastique σ_{es} de la soudure. Il admet ensuite que ρ'_m est peu inférieure à ρ_m et il y substitue cette valeur, qu'il exprime par la formule donnée précédemment. D'où il tire :

$$\frac{R L'_m}{S_b} \leq \frac{\sigma_{es} c v}{\alpha Q}$$

Si cette condition n'est pas satisfaite, le joint soudé va se fissurer. M. Takeo Naka considère, en effet, la section S_j variable pendant la confection de la soudure, ce qui revient à admettre que le retrait se développe proportionnellement à T ou $\frac{S_j \times L'_m}{v}$. La fissuration peut donc se

produire à un instant quelconque de la soudure.

Cette condition appelle de sérieuses réserves, parce que les expériences faites sur des pièces encastrees ont montré que le retrait, qui varie d'ailleurs avec la longueur de mesure, est fortement réduit par rapport au retrait de la même pièce libre et cela d'une manière influencée par les conditions de bridage. Ensuite, σ_{es} varie considérablement au cours de la soudure en fonction de la température. Enfin, la force de bridage est aussi limitée, selon la longueur de bridage, par la limite élastique atteinte dans l'acier de base du barreau, compte tenu aussi du régime thermique. La très honorable tentative d'étude mathématique du Professeur Takeo Naka trouve comme pierre d'achoppement la discordance entre les hypothèses simplifiées du calcul et les conditions complexes réelles.

On peut conclure que l'étude du retrait, des déformations et des tensions intéressant les assemblages soudés doit se poursuivre actuellement avec le plus d'effet utile par la voie expérimentale, susceptible de préparer le terrain à l'étude mathématique ultérieure, en tout état de cause très compliquée et très difficile.

Quel est, au point de vue scientifique, l'état de la question de la soudabilité des aciers de construction et des ruptures fragiles? Il y a particulièrement lieu de se demander, à leur sujet, si les questions posées sont justes. Il n'est pas douteux, en premier lieu, que ces questions doivent être considérées dans le cadre des problèmes de connexion des assemblages soudés et non d'une manière isolée, en soi. Cela paraît évident pour la soudabilité, qui ne semble avoir de sens que par l'application de soudure. Cependant, ne voit-on pas la majeure partie des recherches relatives à la soudabilité s'effectuer dans des voies où l'application de soudure est

absente. Et cela sous l'impression dominante du danger des ruptures fragiles. Cette corrélation est admissible en soi, parce que la rupture fragile n'exige pas l'action de la soudure. Mais il semble que l'on ait de la peine à admettre que l'effet de la soudure n'exclut pas la rupture fragile. Au total, il semble que ces questions introduisent actuellement dans le domaine scientifique plus de confusion que de clarté. Cette difficulté ne sera surmontée qu'en insérant la soudabilité et les ruptures fragiles à leur place exacte dans les problèmes de connexion des assemblages soudés. Cela conduit notamment à la notion de la soudabilité constructive (2), sur laquelle je ne m'étendrai pas ici, et à celle de la sécurité des assemblages soudés, qui est la synthèse et la clef du problème de connexion, c'est-à-dire des déformations et des tensions, en rapport avec les propriétés des matériaux.

Faut-il une fois de plus rompre une lance contre l'aberration que constitue le postulat de la résolution des problèmes de la construction soudée par des considérations de soudabilité et des recettes destinées à mettre à l'abri des ruptures fragiles. Notons, par exemple, que des essais récents sur des éprouvettes extraites d'une tôle qui devrait posséder des qualités de haute soudabilité ont donné des ruptures fragiles par traction d'éprouvettes prismatiques sans entailles, phénomène encore jamais rencontré depuis plus de 23 ans dans mes laboratoires, au cours de milliers d'essais de cette nature.

C'est le type de la question mal posée et s'écartant donc des voies scientifiques; c'est la négation complète du vrai problème de connexion. On ne peut que souscrire aux opinions très modérées ci-après exprimées par le Professeur

Ed. Amstutz, Président de la Direction du Laboratoire fédéral d'essais des matériaux de Zurich (4) :

» 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 ou 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... »

On peut en dire autant de tous les autres essais et de la notion assez peu précise de la température critique. Toutes ces considérations ne peuvent avoir de valeur que dans la mesure où elles sont insérées dans les problèmes de connexion, en rapport avec les déformations et les tensions des assemblages soudés.

C'est sous cet angle que les interractions entre les points de vue technologique et industriel d'une part et le point de vue scientifique, doivent être considérées si l'on désire que, même dans l'état encore peu avancé où elle se trouve, la science des assemblages soudés puisse formuler déjà des suggestions utiles à l'application.

BIBLIOGRAPHIE

1. Takeo Naka. — Shrinking and cracking of welded joints. *The Japan Science Review*, Vol. 1 n° 2, Juin 1950.
2. F. Campus. — Recherches, études et considérations sur les constructions soudées. Ed. Sciences et Lettres, Liège, 1946.
3. F. Campus. — Influence de la longueur d'une soudure bout à bout sur le retrait transversal. *C. R. Ac. des Sciences*. Paris, t. 232, n° 9, 26 février 1951.
4. Ed. Amstutz. — Einige allgemeine Ueberlegungen zur Prüfung der Stähle auf Spröbruchneigung. *Schweizer Archiv für angewandte Wissenschaft und Technik*, n° 5, mai 1952.