Quelques aspects de la résistance à la fatigue des constructions soudées et de sa détermination

Autor(en): **Louis, H.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE publications = Mémoires AIPC = IVBH Abhandlungen**

Band (Jahr): **26 (1966)**

PDF erstellt am: **01.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-20877

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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Quelques aspects de la résistance à la fatigue des constructions soudées et de sa détermination

Einige Aspekte der Dauerfestigkeit geschweißter Konstruktionen und deren Bestimmung

Some Aspects of the Fatigue Strength of Welded Constructions and of its Determination

H. LOUIS
Professeur à l'Université de Liège. Inspecteur Général des Ponts et Chaussées

Le problème du calcul des assemblages soudés préoccupe de plus en plus l'ingénieur constructeur qu'il soit mécanicien ou projeteur d'ouvrages d'art.

Cependant, le calcul statique de ces assemblages est encore discuté, les critères actuellement retenus pour ce calcul varient d'un pays à l'autre et les dimensions auxquelles ils conduisent peuvent, dans certains cas, varier du simple au double.

Quoi qu'il en soit, la préoccupation essentielle se porte sur le dimensionnement en fatigue des assemblages soudés; en effet, même pour des constructions réputées peu sollicitées par fatigue, réputation d'ailleurs souvent attribuée sans grande certitude, l'apparition d'une fissure même en apparence bénigne, constitue toujours un risque grave.

Si cette fissure ne se propage pas en rupture franche par fatigue, elle peut être, notamment dans le cas d'ouvrage comprenant des éléments de forte épaisseur, sollicités par traction, l'origine ou l'initiation d'une rupture fragile aux conséquences redoutables pour la vie de la construction.

Quel que soit le type de sollicitation statique ou par fatigue, le risque n'est pas éliminé par une surabondance des dimensions des cordons de soudure; il est au contraire accru et même considérablement, par un dimensionnement exagéré des assemblages.

Le problème technique rejoint ici le problème économique; il y a lieu de dimensionner les assemblages soudés en leur donnant la section minimum compatible avec la résistance de la pièce assemblée.

En effet, dans un assemblage soudé, la position de la section de rupture par fatigue est toujours étroitement liée au joint soudé, que l'on peut brièvement définir par sa forme, ses dimensions, la qualité du métal qui le constitue et la qualité de son exécution.

Le joint porte en lui la source de nombreux effets défavorables que je citerai seulement: effet d'entaille géométrique, effet d'entaille métallurgique, effet de rigidité, effet de continuité, effet de tensions résiduelles.

Tous ces effets sont plus ou moins proportionnels à la section du joint soudé; mais celui-ci constitue toujours une discontinuité qui a pour effet de diminuer la résistance à la fatigue des éléments du métal de base affectés par ce joint. De plus, sauf dans le cas de soudure contenant de graves défauts, la rupture par fatigue d'un assemblage soudé a lieu le plus souvent dans le métal de base, la forme de l'assemblage étant déterminante.

Dès lors, il semble possible d'affirmer que la rupture par fatigue est en général évitée si la tension nominale dans l'élément du métal de base est inférieure à la *limite d'endurance* de l'élément du métal de base intervenant dans un assemblage soudé d'un type déterminé.

On peut dès lors *dans le principe* dimensionner de la façon suivante un assemblage soudé sollicité par fatigue:

— déduire la tension admissible dans le métal de base, des résultats d'essai de fatigue sur des assemblages comportant le type de joint considéré;

— dimensionner les cordons de l'assemblage, considérés comme sollicités statiquement en y adoptant comme tension de comparaison, la tension admissible en fatigue du métal de base pour le type de cordons considéré.

Le calcul en fatigue implique donc une connaissance suffisamment exacte de la limite d'endurance des assemblages rencontrés dans la construction, c'est-à-dire pour un métal de base donné, pour un type de cordons déterminé et pour une sollicitation donnée.

Un de nos anciens assistants, M. Bourguignon, a publié un important travail sur la question; il a établi des courbes de tensions admissibles pour un grand nombre d'assemblages, en fonction de la sollicitation par fatigue définie par le rapport bien connu $\mu = \frac{\sigma_{min.}}{\sigma_{max.}}$ et pour les aciers de construction de nuances 37 et 52.

Ce travail l'a conduit à utiliser entre autres les résultats de 116 études expérimentales entreprises de par le monde et concernant la résistance à la fatigue des assemblages soudés.

Les conclusions non encore définitives mais déjà très satisfaisantes auxquelles il a abouti, constituent un jalon important dans le domaine du calcul à la fatigue des constructions soudées; elles ont d'ailleurs été utilisées dans d'assez nombreux cas pratiques et vérifiées au laboratoire dans certaines occasions.

Il n'en reste pas moins que beaucoup reste à faire; c'est la raison pour laquelle nous avons proposé au C.R.I.F. la réalisation d'un important programme d'essais de fatigue afin de combler, en partie du moins, les lacunes de la documentation existante quant à la connaissance de la limite d'endurance ou d'une limite de fatigue pour de nombreux assemblages importants et fréquemment rencontrés en fatigue.

Ceci explique pourquoi nous avons été amenés depuis quelques années, à étudier le comportement en fatigue des assemblages soudés en vue d'apporter une contribution, si modeste soit-elle, au calcul des constructions soudées sollicitées en fatigue.

Placés devant ce problème en sachant combien les essais de fatigue sur des assemblages de grandes dimensions sont coûteux et de longue durée, mes collaborateurs et moi avons cherché les moyens d'abréger le délai d'exécution de ces recherches et d'en réduire le coût, tout en aboutissant à des résultats valables scientifiquement.

Mon propos dans cette communication sera de faire le point de ce qui a été réalisé jusqu'à présent.

En ce qui concerne le *tracé des courbes de Wöhler*, nous rappellerons d'abord la définition adoptée:

Si pour une valeur donnée de $\mu = \frac{\sigma_{min.}}{\sigma_{max.}}$, on sollicite un certain nombre d'éprouvettes supposées identiques en choisissant pour chacune d'elles une valeur de la sollicitation maximum $\sigma_{max.}$, la courbe de Wöhler s'obtient en portant en ordonnée les valeurs de $\sigma_{max.}$ et en abscisse les nombres n de mises en charge après lesquelles chaque éprouvette s'est rompue. L'échelle des abscisses est logarithmique en raison du rapport élevé suivant lequel varient les valeurs de n.

Il y a donc autant de courbes de Wöhler que de valeurs possibles de μ.

La limite d'endurance pour une valeur de $\mu = i$, est la tension $\sigma_{max.}$ en dessous de laquelle la pièce peut être soumise indéfiniment à la sollicitation donnée sans se rompre.

La limite de fatigue pour $\mu = i$ est la valeur de la tension $\sigma_{max.}$ en dessous de laquelle la pièce peut être soumise $n = N$ ($2 \cdot 10^6$ par exemple) fois à la sollicitation donnée sans se rompre.

Comme les sollicitations des constructions varient notamment suivant la valeur du rapport μ, la détermination des courbes de Wöhler nécessaires à la détermination des limites d'endurance et de fatigue, est pratiquement et matériellement impossible.

Conscient de ce problème, M. le Professeur Stüssi de l'E.P.F. à Zurich, a établi une théorie qui est plutôt un essai de formulation quantitative du problème de la fatigue. Il propose une équation de la courbe de Wöhler, une relation entre les limites d'endurance pour différentes valeurs de μ et il introduit la notion d'effet d'entaille qui caractérise un joint déterminé.

L'équation de la courbe de Wöhler s'écrit:

$$\sigma_{iN} = \frac{\sigma_R + C_i N^p \sigma_i}{1 + C_i N^p},$$

σ_{iN} est la limite de fatigue pour un nombre N de mises en charge et une valeur du rapport $\mu = i$;
σ_i est la limite d'endurance pour le même rapport;
σ_R est la tension de rupture statique en traction du métal de base;
N est le nombre de sollicitations;
C_i et p sont des paramètres constants.

Si on connaît σ_R et trois groupes de valeurs $(\sigma_{iN_1}, N_1)(\sigma_{iN_2}, N_2)(\sigma_{iN_3}, N_3)$, on peut par des calculs algébriques assez simples obtenir σ_i et tracer la courbe de Wöhler (inconnues σ_i, C_i et p).

Cette équation est plus maniable lorsqu'elle se présente sous la forme logarithmique:

$$\log \frac{\sigma_R - \sigma_{iN}}{\sigma_{iN} - \sigma_i} = p j + \log C_i \quad \text{où} \quad j = \log N.$$

Si on connaît σ_R et trois groupes de valeurs expérimentales $(\sigma_{iN_1}, N_1;$ $\sigma_{iN_2}, N_2;$ $\sigma_{iN_3}, N_3)$ obtenues avec une seule saleur de μ, en supposant $N_2 - N_1 = N_3 - N_2 = \Delta N$, on peut éliminer p, j et C_i et obtenir $\sigma_i = f(\sigma_R, \sigma_{iN_1}; \sigma_{iN_2}; \sigma_{iN_3})$ pour la valeur correspondante de μ.

On peut également d'après la même théorie de M. Stüssi, tracer la courbe complète de Wöhler sur la base de la connaissance de points expérimentaux. Si on pose $\log \frac{\sigma_R - \sigma_{iN}}{\sigma_{iN} - \sigma_i} = \alpha_N$, l'équation de M. Stüssi devient: $\alpha_N = p j + \log C_i$ qui est représentée par une droite dans le système d'axes cartésiens α, j; si on connaît σ_R et au moins trois groupes de valeurs expérimentales (σ_{iN}, N) la valeur de σ_i est telle que les points α, j se placent sur une droite et on cherche une valeur de σ_i jusqu'à ce qu'il en soit ainsi.

Les paramètres p et C_i se déterminent par la méthode des moindres carrés, bien que le groupe des valeurs α, j soit en général assez petit, trois minimum:

$$p = \frac{\sum \Delta \alpha \Delta j}{(\Delta j)^2}; \qquad \log C_i = \alpha_m - p j_m$$

où $\quad \Delta \alpha = \alpha_N - \alpha_m; \qquad \alpha_m = \frac{\sum \alpha_N}{k}; \qquad \Delta j = j_N - j_m; \qquad j_m = \frac{\sum j}{k},$

k étant le nombre de valeurs dont on dispose.

On peut dès lors tracer la courbe de Wöhler $\sigma_{iN} = f(N)$ pour une même valeur de μ.

Naturellement la courbe ainsi tracée à partir de trois points n'est pas nécessairement la courbe minimum; il est bien entendu que pour obtenir cette dernière, il faudrait pouvoir choisir en raison des dispersions inhérentes aux essais de fatigue, trois valeurs de σ des données expérimentales correspondant aux valeurs associées de n les plus faibles, à condition que celles-ci résultent

aussi d'essais sur des assemblages normalement réalisés et acceptables du point de vue de défauts éventuels.

Le Professeur STÜSSI introduit dans sa théorie sur la fatigue la notion de coefficient d'entaille $\varphi_{ei} = \sigma_{ie}/\sigma_i$ où suivant les notations déjà définies:

σ_{ie} est la limite d'endurance d'une éprouvette entaillée pour $\mu = i$;
σ_i est la limite d'endurance d'une éprouvette non entaillée pour la même valeur de μ.

On admet que φ_e varie linéairement avec la tension moyenne $\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_{min.} + \sigma_{max.})$ entre $\mu = -1$ et $\mu = 1$ (pour $\mu = 1$, $\varphi_e = 1$ car on admet que σ_R est la même pour une tôle sans soudure et une tôle avec soudure bout à bout).

Cette linéarité de φ_e en fonction de μ a été vérifiée à plusieurs reprises à partir de résultats expérimentaux, donnés notamment par le chercheur anglais GURNEY.

Pour $\mu = -1, \varphi_{e-1}$ est une valeur caractéristique d'un type de joint ou d'assemblage qui doit être déterminée dans chaque cas.

En ce qui concerne les assemblages soudés, j'ai déjà énuméré quelques uns des nombreux facteurs géométriques et métallurgiques qui ont une influence sur leur résistance à la fatigue. Je rappellerai seulement la conclusion que j'ai déjà signalée au début de cet exposé.

La rupture par fatigue est en général évitée si la tension nominale dans le métal de base est inférieure à la limite d'endurance d'une tôle contenant un type de joint donné.

A partir de cette limite d'endurance déterminée par des essais sur des assemblages comportant le type de joint considéré, on détermine la valeur de la tension admissible en faisant choix d'un coefficient de sécurité, choix que je ne discuterai pas ici, qui dépend du type de construction et du nombre de fois estimé où les sollicitations maxima prévues dans le calcul seront atteintes.

Cette tension admissible sera adoptée comme tension de comparaison pour le dimensionnement des cordons.

Ce qu'il importe avant tout de déterminer pour le calculateur, c'est le diagramme des limites d'endurance ou de fatigue.

A partir de considérations semi-expérimentales, M. STÜSSI, se basant sur les travaux de HAIGH, a établi en fonction de σ_{-1} (limite d'endurance aux efforts alternés), la valeur de σ_a

$$\sigma_a = \sigma_{-1} \frac{\sigma_R(\sigma_R - \sigma_m)}{\sigma_R(\sigma_R - \sigma_m) + \sigma_{-1}\sigma_m};$$

σ_a est la demi amplitude des tensions $\pm\frac{1}{2}(\sigma_{max.} - \sigma_{min.})$ et σ_m est la tension moyenne $\frac{1}{2}(\sigma_{max.} + \sigma_{min.})$.

Dans l'expression ci-dessus de σ_a, on se fixe des valeurs de σ_m, on en déduit $\sigma_{max.}$ et σ_m.

Supposant connu l'effet d'entaille φ_{e-1}, on peut calculer φ_{ei} pour les différentes valeurs de σ_m car l'effet d'entaille φ_{ei} pour un σ_m donné varie linéairement avec φ_{e-1}.

Pour un assemblage d'un effet d'entaille donné ou apprécié, on a

$$\begin{aligned}
\sigma_{max.e} &= \varphi_{ei}\,\sigma_{max.}, \\
\sigma_{ae} &= \sigma_{max.e} - \sigma_m, \\
\sigma_{min.e} &= \sigma_m - \sigma_{ae}, \\
\mu &= \frac{\sigma_{min.e}}{\sigma_{max.e}}.
\end{aligned}$$

Connaissant μ et $\sigma_{max.e}$ on peut donc tracer le diagramme $\sigma_{max.e}$ en fonction de μ, *c'est-à-dire le diagramme de la limite d'endurance ou de la limite de fatigue en fonction du rapport* μ.

Des courbes théoriques établies à de nombreuses reprises à partir de trois seuls points expérimentaux, judicieusement choisis quand cela était possible, ont représenté dans les cas traités, la limite inférieure du groupe de points expérimentaux donnant l'entièreté de la courbe de Wöhler réelle, sauf parfois pour les valeurs les plus faibles du nombre de sollicitations car l'on confine alors au domaine de la fatigue plastique.

Malgré son intérêt, la méthode de M. Stüssi, si elle permet déjà de réduire le nombre d'essais pour une même valeur de μ et pour un type d'assemblage donné, nécessite la connaissance d'un grand nombre de résultats expérimentaux en vue d'aboutir à l'établissement d'une courbe complète des limites d'endurance pour un seul type de joint, la limite d'endurance variant évidemment avec la valeur de μ.

En outre, les trois résultats expérimentaux dont on dispose pour une seule valeur de μ ne sont pas nécessairement ceux qui conduisent à la courbe théorique minimum des limites de fatigue.

Ces deux critiques, surtout la première, nous ont conduit à utiliser une autre méthode, proposée en 1955 par l'ingénieur italien Locati, dont nous allons voir qu'elle conduit plus aisément encore à des résultats proches de ceux obtenus par la méthode classique, compte tenu des dispersions inhérentes aux essais de fatigue.

La méthode proposée par Locati en vue de déterminer la limite d'endurance de pièces prototypes d'automobiles, prévoit seulement l'essai d'une seule éprouvette, toujours pour une valeur donnée de μ.

Elle repose sur l'application du critère de Miner basé sur la notion de dommage cumulatif. On suppose que la fissure de fatigue débute dès le premier cycle et que les courbes de croissance de la section de la partie fissurée en fonction du nombre de cycles et pour différents états de tension ont la *même forme;* on peut donc écrire

$$\frac{\Omega}{\Omega_{cr}} = f\left(\frac{n_i}{N_i}\right),$$

si Ω_{cr} est l'aire fissurée critique définissant la rupture,
n_i est le nombre de cycles à amplitude constante σ_i,
N_i est le nombre de cycles nécessaires pour produire Ω_{cr} sous σ_i.

La fig. 1 montre d'abord les courbes de croissance supposées pour les trois amplitudes $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ et ensuite les mêmes courbes réduites à une seule en portant en abscisse le rapport n_i/N_i au lieu de n_i.

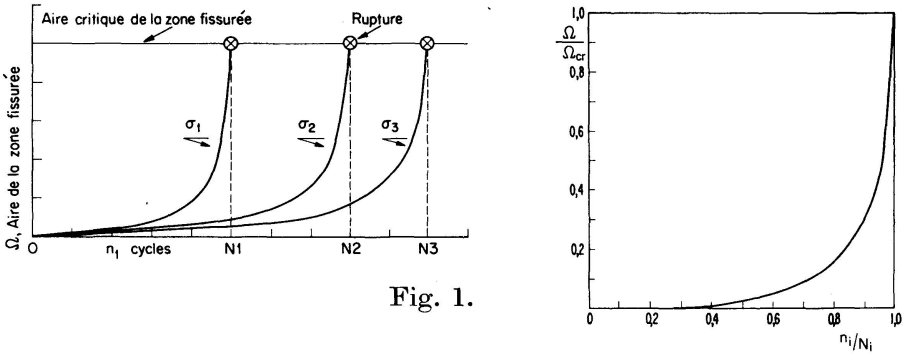

Fig. 1.

La condition de croissance de la fissure s'écrit alors:

$$\frac{\Omega}{\Omega_{cr}} = f\left(\sum \frac{n_i}{N_i}\right); \text{ à la rupture } \frac{\Omega}{\Omega_{cr}} = 1 \text{ donc } \sum \frac{n_i}{N_i} = 1,$$

ce qui est le critère de MINER.

Ce critère correspond au comportement réel des ouvrages; ceux-ci, pendant leur vie, ne sont pas soumis au même cycle de tension, mais à des cycles d'amplitudes diverses qui ont tous un effet sur la résistance de l'ouvrage.

On admet dès lors qu'un certain nombre de cycles n_1 à une tension σ_1 *supérieure à la tension d'endurance* produisent un degré déterminé de dommage, non seulement sur la limite d'endurance mais sur la vie de la pièce à tous les niveaux de tensions. L'hypothèse la plus simple est d'admettre que le dommage varie linéairement avec le nombre de cycles, de telle sorte que le dommage correspondant à n_1 cycles vaut n_1/N_1, si N_1 est le nombre de cycles qui amène la rupture au niveau σ_1.

Si, à présent, une pièce est sollicitée par n_1 cycles au niveau σ_1; n_2 cycles au niveau σ_2, etc., elle se rompra quand le dommage causé vaudra l'unité, c'est-à-dire quand on aura $\sum \frac{n_i}{N_i} = 1$.

Ce critère, dont la validité est contestable dans certains cas (prétension + pièce entaillée), donne cependant la tension effective avec une précision satisfaisante quand on s'impose au départ la vie N à prévoir pour la pièce (par ex. $N = 2 \times 10^6$) et que l'on désire déterminer la tension effective que la pièce peut supporter, cette tension effective étant la valeur de l'amplitude cyclique de

tension qui, appliquée à amplitude constante, donne la même vie (N) que le chargement à amplitude variable réelle.

Le critère de MINER ne donne pas une réponse précise si on veut prédire la vie N d'une pièce soumise à une amplitude de tension donnée.

Dans la méthode de LOCATI, une seule éprouvette est soumise, pour une valeur donnée de μ, à n cycles pour chacun de plusieurs paliers de charge, $\sigma_1 ; \sigma_1 + \Delta\sigma ; \sigma_1 + 2\Delta\sigma \ldots$; l'essai se poursuit *jusqu'à rupture* ; la durée du dernier palier est normalement inférieure à n.

Si on connaissait la courbe réelle de Wöhler, on pourrait dire, en appliquant le critère de MINER, que le dommage cumulé vaut $\frac{n}{N_1} + \frac{n}{N_2} + \ldots + \frac{\varphi n}{N_t} = 1$, $N_1, N_2, \ldots N_t$ étant sur la courbe de Wöhler et correspondant aux différentes tensions de chaque palier (fig. 2).

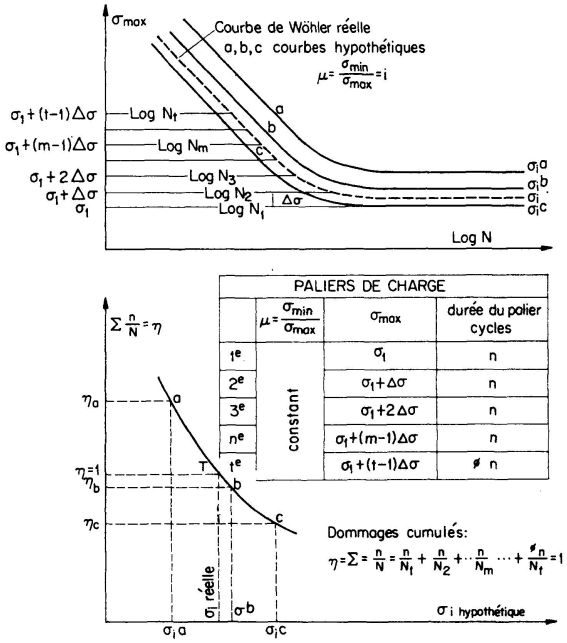

Fig. 2. Méthode de LOCATI.

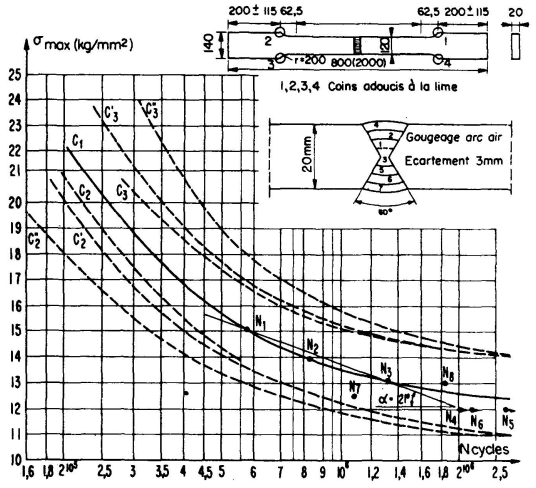

Fig. 3. Méthode de LOCATI — essais L_1 à L_4. Réseau de courbes de WÖHLER.

C_1 courbe de WÖHLER calculée à partir des 3 points expérimentaux N_1, N_2, N_3 (méthode de STÜSSI). Eprouvettes: rompues ●, non rompues ●→.

Mais dans la réalité la courbe de Wöhler n'est pas connue, aussi l'idée de Locati a-t-elle été de calculer les dommages cumulés pour un réseau de courbes de Wöhler hypothétiques dont le tracé est seulement inspiré par l'*allure* de la courbe réelle déterminée pour un assemblage comparable à celui étudié et en n'envisageant qu'une seule valeur du rapport μ. La courbe qui satisfait à l'égalité $\sum \frac{n_i}{N_i} = 1$ est adoptée comme courbe de Wöhler de l'assemblage étudié.

Pratiquement on trace un réseau de trois ou quatre courbes parallèles entre elles et à la courbe réelle particulière qui vient d'être définie (fig. 2). On calcule pour chacune de ces courbes la valeur de $\sum \frac{n_i}{N_i}$, que l'on porte sur un graphique en fonction de la limite de fatigue ou d'endurance de chacune des courbes du

réseau. Ces points sont réunis par une courbe dont l'intersection avec l'horizontale $\sum \frac{n_i}{N_i} = 1$ donne en abscisse la limite de fatigue ou d'endurance cherchée et dans le réseau choisi, la courbe de Wöhler qui satisfait à l'hypothèse de MINER (fig. 2).

Mes collaborateurs ont cherché à vérifier la qualité des résultats donnés par la méthode de LOCATI, soit à l'occasion de recherches faites en laboratoire, soit en se servant de résultats puisés dans la littérature.

De l'ensemble des essais et des comparaisons qu'ils ont faites, on peut tirer quelques conclusions très générales:

1. L'écart entre les résultats de la méthode de LOCATI et de la méthode classique est *en moyenne* de l'ordre de 5% pour les éprouvettes vierges et de l'ordre de 10% pour les assemblages quel que soit d'ailleurs le mode d'assemblage. Ce faible écart confirme l'hypothèse de MINER car il est du même ordre de grandeur sinon moindre que les dispersions constatées lors des essais de fatigue traditionnels.

2. En ce qui concerne le réseau de courbes hypothétiques, son choix ne semble guère avoir d'importance, que les courbes soient parallèles, divergentes ou convergentes par rapport à la courbe de référence; aussi par simplification est-il plus commode d'adopter un réseau de courbes parallèles.

3. Il y a intérêt à adopter pour le premier palier de charge, une tension légèrement inférieure à la limite d'endurance de la courbe de référence.

4. L'espacement entre chaque palier de charge et le nombre de mises en charge pour chaque palier, ne semble pas jouer un grand rôle pour autant que la tension finale ne soit pas trop élevée.

A titre d'exemple, la courbe C_1 de la fig. 3 donne la courbe de Wöhler déterminée par la méthode de M. STÜSSI à partir de trois résultats d'essais qui, ainsi qu'on peut l'observer, ne sont pas nécessairement les mieux choisis.

Cependant on peut dire que la limite de fatigue à $2 \cdot 10^6$ mises en charge est très probablement comprise entre 12 et 13 kg/mm², la courbe de M. STÜSSI donnant pour cette limite une valeur de 12,6 kg/mm².

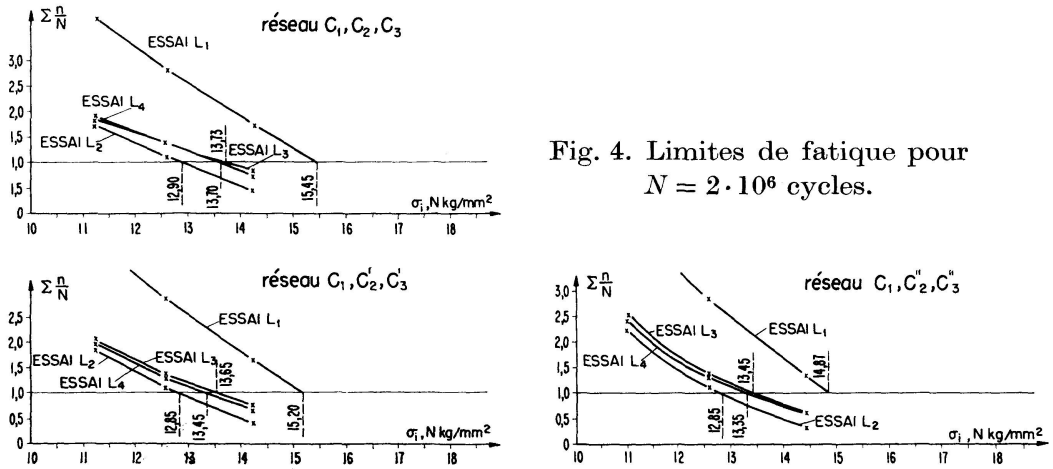

Fig. 4. Limites de fatique pour $N = 2 \cdot 10^6$ cycles.

Cette courbe de Wöhler a été choisie comme courbe de référence en vue de l'application de la méthode de LOCATI.

Pour le même assemblage (joint soudé bout à bout en soudure verticale montante reliant deux plats en acier 52), quatre essais ont été faits suivant la méthode de LOCATI en faisant varier la tension de départ et l'écart entre paliers mais en conservant le même nombre de mises en charge par palier (fig. 3 et 4).

Pour chacun des réseaux choisis, la courbe médiane est celle déterminée par la méthode de STÜSSI sur la base de résultats d'essais classiques. Le premier faisceau ($C_1 C_2 C_3$) est convergent, le deuxième ($C_1 C_2' C_3'$) est parallèle, le troisième ($C_1 C_2'' C_3''$) est divergent.

On constate que:

— L'allure relative des courbes du réseau choisi n'a pratiquement aucune influence sur la limite de fatigue.
— Trois essais donnent des valeurs de la limite de fatigue très rapprochées (entre 12,9 et 13,7 kg/mm^2) à comparer avec la limite de 12,6 kg/mm^2 obtenue par la méthode de M. STÜSSI.
— Un essai (L_1) conduit à une limite de fatigue notablement plus élevée, allant de 14,87 à 15,45 kg/mm^2 suivant le type de réseau de courbes.
— Cette différence ne peut guère s'expliquer que par une qualité meilleure et même exceptionnelle du joint soudé; en effet cette valeur moyenne de 15 kg/mm^2 obtenue par cet essai comme limite de fatigue à $2 \cdot 10^6$ mises en charge, est à comparer aux valeurs suivantes de la limite de fatigue:
  12 à 13 kg/mm^2 obtenue par la méthode classique.
  12,6 kg/mm^2 obtenue par la méthode de M. STÜSSI.
  12,9 à 13,7 kg/mm^2 obtenue lors de 3 essais par la méthode de LOCATI.

Bien que les résultats obtenus par la méthode classique et par la méthode de LOCATI soient, dans la majorité des cas, suffisamment concordants, il apparaît, notamment d'après l'exemple qui vient d'être cité, qu'une détermination de la limite de fatigue ou d'endurance par la méthode de LOCATI devrait toujours être suivie d'un essai de fatigue pour lequel la tension maximum serait égale à la limite de fatigue ou à la limite d'endurance obtenue par la méthode de LOCATI.

En décrivant cette méthode, nous avons montré la nécessité de disposer d'une courbe de Wöhler de référence. L'utilisation de la méthode de M. STÜSSI permet d'autre part de tracer cette courbe à partir de trois résultats expérimentaux avec une précision suffisante pour une utilisation de la méthode de LOCATI.

Dans le souci de réaliser une importante économie de temps, notre ancien assistant M. BOURGUIGNON déjà cité, a imaginé de réaliser pour un certain nombre d'assemblages une seule éprouvette dont l'essai permet l'obtention de trois ou quatre résultats.

L'éprouvette se compose, suivant le cas et les possibilités de la machine d'essai, de trois ou quatre tronçons de même épaisseur et de *largeurs différentes*, chaque tronçon contenant le joint ou l'assemblage à étudier, est relié aux deux voisins par des raccordements progressifs (fig. 5).

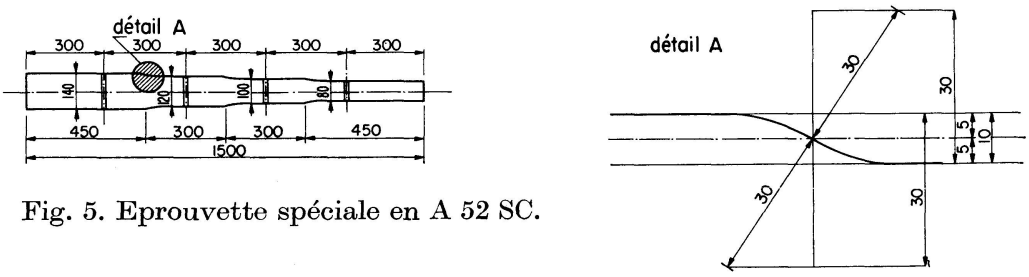

Fig. 5. Eprouvette spéciale en A 52 SC.

Lors d'un essai de fatigue par traction ou par compression, la tension maximum est différente dans chaque tronçon tandis que le rapport $\mu = \frac{\sigma_{min.}}{\sigma_{max.}}$ reste le même.

Après la rupture de la section la plus faible, on remet en fatigue l'éprouvette composée des tronçons restants en conservant évidemment les mêmes sollicitations.

On obtient ainsi au moyen d'une seule éprouvette, trois ou quatre points de la courbe de Wöhler pour une durée d'essai égale à celle de l'éprouvette classique de section transversale égale à celle du tronçon le plus large.

Afin de vérifier l'influence éventuelle du facteur dimensions de l'éprouvette de largeurs variables, des essais comparatifs ont été exécutés sur des éprou-

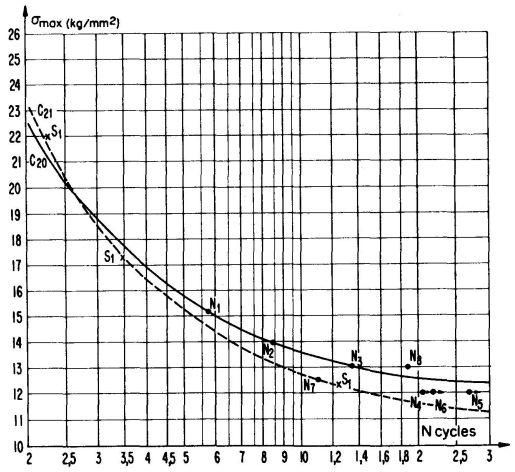

Fig. 6. Méthode de Stüssi. Courbes de Wöhler (essais S_1 et N_1 à N_8).

——— Courbe de Wöhler calculée à partir de N_1, N_2, N_3

----- Courbe de Wöhler calculée à partir des essais S_1

Eprouvettes
- N_1 à N_8
  - rompues ●
  - non rompues ●→
- S_1
  - rompues ×
  - non rompues ×→

vettes classiques de largeur égale à celle du tronçon le plus étroit de l'éprouvette spéciale.

La fig. 6 donne les courbes de Wöhler ($\mu = 0{,}1$) calculées à partir de la méthode de M. Stüssi pour les éprouvettes classiques (points N_1, N_2, N_3) et pour l'éprouvette spéciale (3 des 4 points S_1).

L'écart entre les limites de fatigue à 2 millions de cycles est de 1 kg/mm². La différence peut s'expliquer à partir des domaines différents des valeurs de $\sigma_{max.}$, qui varient entre 12 et 13 kg/mm² pour les éprouvettes classiques et entre 12,3 et 21,9 kg/mm² pour les éprouvettes spéciales. On en déduit que les largeurs variables de l'éprouvette spéciale ne devraient pas être trop différentes.

La fig. 7 donne la courbe de Wöhler minimum obtenue directement, donc sans recourir à la méthode de M. Stüssi pour $\mu = 0{,}5$, à l'aide de deux éprouvettes spéciales seulement.

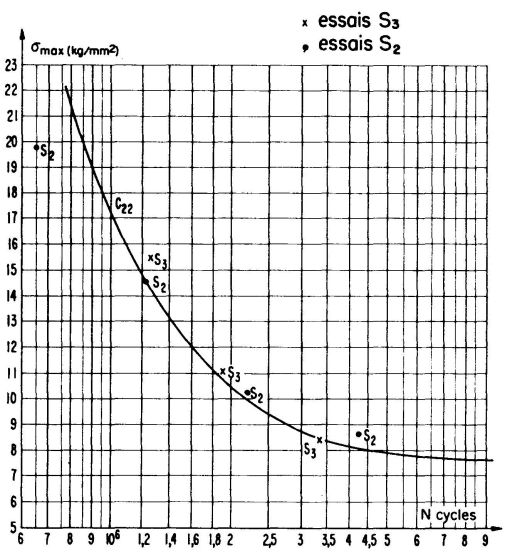

Fig. 7. Méthode de Stüssi. Courbe de Wöhler calculée à partir des essais S_3. $\mu = +0{,}5$.

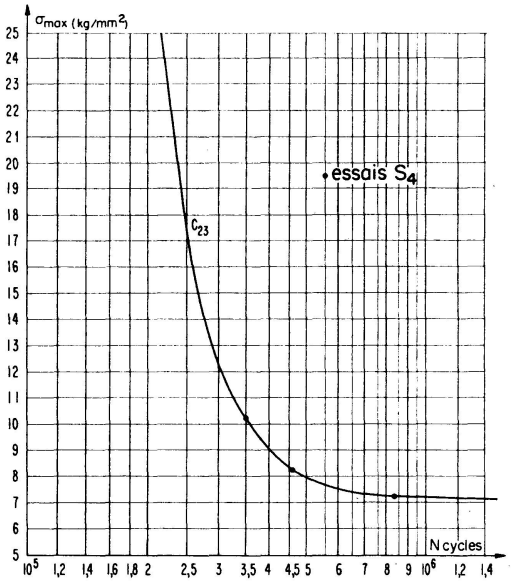

Fig. 8. Méthode de Stüssi. Courbe de Wöhler calculée à partir des essais S_4.

La fig. 8 similaire aux fig. 6 et 7, est relative à un cas de fatigue alternée ($\mu = -1$) pour lequel en raison des dimensions des mors de la machine, l'éprouvette spéciale pouvait seulement être composée de 3 tronçons (tracé de la courbe de Wöhler par la méthode de M. Stüssi).

La fig. 9 donne la courbe des limites de fatigue pour $N = 2 \cdot 10^6$ en fonction *du rapport* μ. Cette courbe établie à partir de la méthode de M. Stüssi en considérant un coefficient d'entaille φ_{e-1} égal à 0,4 est relative à un joint soudé bout à bout en position difficile de deux plats en acier A 52. Sur ce diagramme, on a reporté les valeurs de limites de fatigue à $2 \cdot 10^6$ mises en charge obtenues lors d'essais classiques (valeur N) et lors de quatre essais sur éprouvettes spéciales.

On voit que la confirmation de la courbe proposée par les résultats d'essais est remarquable sinon inespérée.

Toujours à propos de ces éprouvettes spéciales, signalons que dans le cas de joints soudés bout à bout, la durée totale de l'essai de fatigue est réduite de moitié environ par rapport au temps nécessaire pour rompre quatre éprouvettes classiques.

Au début de cet exposé, j'ai signalé entre autres effets défavorables des assemblages soudés celui dû aux tensions résiduelles de soudage, qu'il s'agisse de tensions résiduelles inhérentes au soudage d'éléments libres de se déformer (tensions directes) ou de tensions résiduelles dues à l'encastrement ou au bridage des éléments à relier par soudage (tensions indirectes).

Il n'y a cependant pas lieu d'être toujours aussi péjoratif à l'égard des tensions résiduelles. L'idée déjà vieille de maîtriser ces tensions et mieux encore de les créer en vue de leur faire jouer un rôle favorable dans le comportement des constructions, est en train de faire son chemin. Des cas assez nombreux peuvent déjà être cités où des tensions résiduelles induites dans les constructions remplissent en quelque sorte le rôle des précontraintes devenues courantes dans les ouvrages en béton.

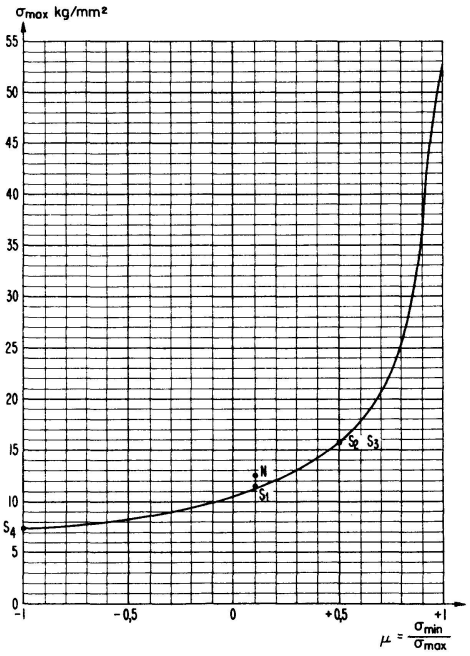

Fig. 9. Diagramme des limites de fatigue pour $N = 2 \cdot 10^6$ cycles.

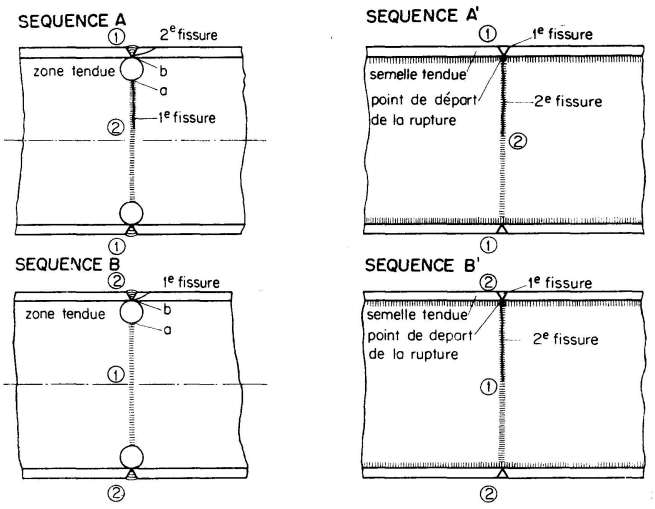

Fig. 10.

De nombreux travaux ont déjà été publiés à propos des tensions résiduelles créées par compression ou par chauffage localisé et qui améliorent grandement la résistance à la fatigue d'éléments de construction.

Dans le domaine des constructions métalliques, une idée semblable nous préoccupe depuis longtemps; elle consiste à induire dans une construction déterminée des tensions résiduelles judicieusement réparties en choisissant un ordre approprié d'exécution des joints, c'est-à-dire en déterminant une séquence appropriée du soudage.

Une récente recherche de principe a consisté dans l'étude du comportement en fatigue par flexion de deux tronçons de poutrelles laminées en I (DIE 20) assemblés par un joint de soudure bout à bout, situé lors de l'essai dans une zone à moment fléchissant constant.

L'idée était de rechercher l'influence de la séquence d'exécution du joint soudé sur le comportement en fatigue de la poutre.

Chaque assemblage comporte deux joints en V de semelle (60°) et un joint d'âme, aussi en V (60°, épaisseur de l'âme: 7 mm).

Dans une première série d'essais, des ouvertures usinées sont ménagées au droit de l'assemblage entre les semelles et les extrémités du joint d'âme: ces ouvertures qui donnent lieu certainement à des concentrations de tension, sont prévues afin de pouvoir réaliser des soudures sans défaut; dans une deuxième série d'essais, ces ouvertures n'ont pas été réalisées.

Dans les séries appelées A, A', les semelles ont toutes été entièrement soudées avant l'exécution de la soudure d'âme; dans les séries B, B', la soudure d'âme a été faite en premier lieu (fig. 10).

De ces séquences, on peut déduire qu'en principe, la séquence A induira des tensions résiduelles de traction dans l'âme et de compression dans les semelles; l'inverse se produira avec la séquence B (compression dans l'âme et traction dans les semelles).

On peut dire à priori que, dans une sollicitation par flexion, la séquence A est la plus favorable, puisque dans la semelle où la contrainte est la plus importante, la contrainte de traction est réduite.

Les poutrelles sont soumises à flexion pulsatoire; la valeur $\mu = \frac{\sigma_{min.}}{\sigma_{max.}}$ est constante et vaut 0,1; le joint soudé est à mi-portée, la poutre est sollicitée par deux charges égales, symétriques, par rapport à l'axe médian (fig. 11).

Les tensions résiduelles ont été mesurées par voie destructive sur une poutrelle de chacun des 4 types; des bases de mesures ont été matérialisées suivant l'axe longitudinal des poutres sur chaque face de l'âme et des semelles.

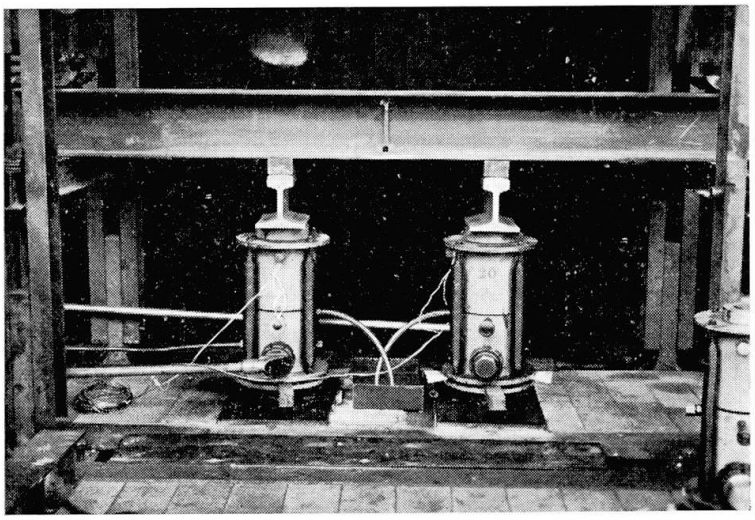

Fig. 11.

La fig. 12 donne les diagrammes des tensions résiduelles de soudage, chaque point correspondant à la moyenne arithmétique des mesures sur les 4 bases disposées symétriquement par rapport aux deux axes principaux de la poutre.

On peut déduire de ces diagrammes les valeurs suivantes:

Poutres	Points	Tension (kg/mm²)
A	a	+18,4
B	b	+ 2,7
A'	c	+18,1
B'	c	− 5,1

Les modes de rupture sont différents pour les séquences A et B; la rupture des poutres du type A (tensions résiduelles de traction dans l'âme) s'est tou-

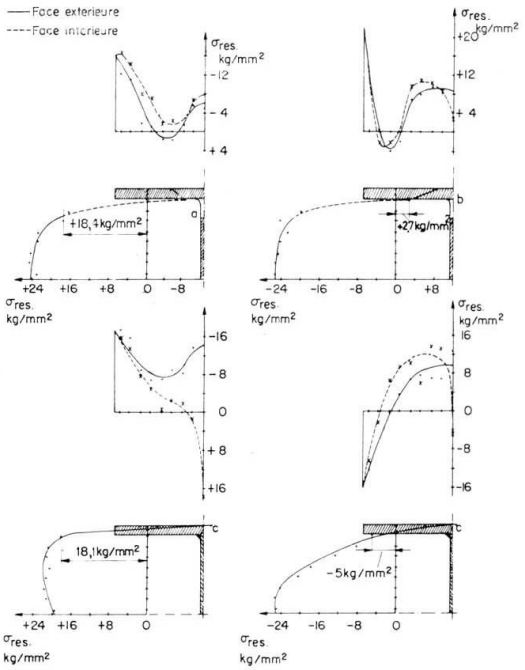

Fig. 12.

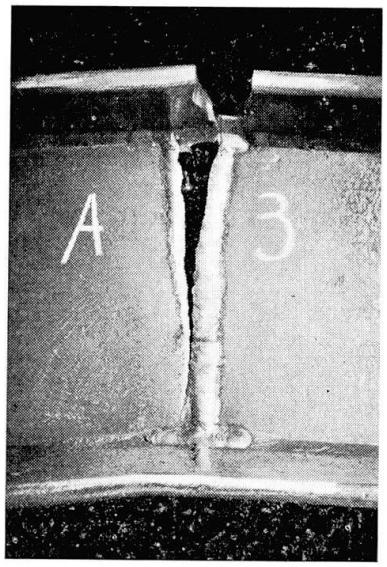

Fig. 13.

Fig. 14.

jours amorcée dans l'âme *(point c)*, elle s'y propage et une seconde fissure apparaît alors dans la semelle et s'y propage également (fig. 13).

Pour les poutres B au contraire la fissure s'amorce au bord supérieur b de l'ouverture et se propage dans la semelle, il n'y a aucune amorce de rupture par fatigue dans le joint d'âme (fig. 14).

9 poutrelles du type A et 8 poutrelles du type B ont été essayées.

Les courbes de Wöhler ont été tracées pour chaque type de poutre (fig. 15).

La limite de fatigue à 2 millions de cycle et pour $\mu = 0{,}1$ vaut 12,1 kg/mm² dans le cas de la séquence A et 8,2 kg/mm² pour la séquence B; ces tensions étant calculées pour la charge correspondante de la poutre, à la fibre extrême de celle-ci.

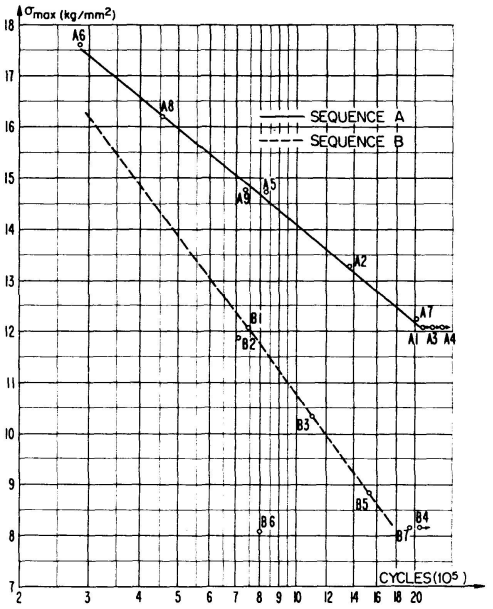

Fig. 15. Courbes de WÖHLER.
$\left(\mu = \frac{\sigma_{min.}}{\sigma_{max.}} = 0{,}1\right)$.

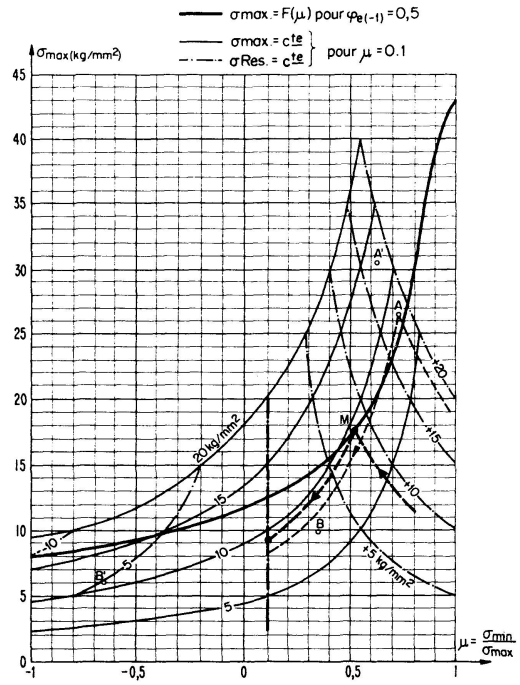

Fig. 16.

Le gain de résistance à la fatigue obtenu par la séquence A est donc de 50% par rapport à la séquence B.

Connaissant le point de départ de la rupture, on peut y calculer la tension limite, pour 2 millions de cycles: elle est de $12{,}1 \cdot \frac{64}{95} = 8{,}15$ kg/mm² au point a des poutres de la séquence A, sans tenir compte du déforcement du joint et de $8{,}2 \cdot \frac{84}{95} = 7{,}25$ kg/mm² au point b des poutres de la séquence B.

On remarque que le résultat de la poutre $B\,6$ est anormalement bas; ceci paraît dû au fait que dans les joints de semelle de cette poutre, la reprise au dos a été le cordon déposé le dernier par erreur, cette séquence de soudage défectueuse a induit des tensions de traction résiduelles anormalement élevées au point b, origine des ruptures (l'épaisseur des semelles est seulement de 11 mm).

Pour les poutres dont le joint ne comportait pas d'ouverture, 3 essais ont été faits pour chacune des séquences A et B.

Les limites de fatigue à 2 millions de cycles ont été établies par la méthode de LOCATI; elles sont en moyenne et aux fibres extrêmes de 13,30 kg/mm² pour la séquence A et de 12,50 kg/mm² pour la séquence B; l'avantage de la séquence A est donc moins grand que pour les poutres dont les joints comportaient des ouvertures. Quelle que soit la séquence, la rupture se propage à partir de la jonction du joint d'âme et du joint de la semelle tendue. Cela semble s'expliquer par le fait qu'on observe toujours un défaut à la rencontre des deux joints.

La première fissure apparaît dans la semelle tendue et une seconde naît ensuite dans l'âme.

En appliquant la méthode de M. STÜSSI, on a calculé la courbe d'endurance de la manière signalée au début de l'exposé en considérant un effet d'entaille $\varphi_{e-1} = 0{,}50$ que nous avons choisi à partir d'essais faits à l'étranger pour des assemblages de ce type (fig. 16).

Les essais permettent, dans le principe du moins, de prévoir la limite d'endurance à partir de la connaissance de l'effet d'entaille de l'assemblage et de la grandeur de la tension résiduelle agissant au droit de l'amorce de la rupture, moyennant l'hypothèse que la limite élastique ne soit pas dépassée en aucun endroit de la poutre au cours de la pulsation ou, en d'autres mots, que le principe de superposition des effets est applicable.

Dans cette hypothèse, la tension au droit du début de la fissuration varie entre $\sigma_{min.} + \sigma_{résid.}$ et $\sigma_{max.} + \sigma_{résid.}$.

Dans le diagramme de la limite de fatigue en fonction du rapport μ, l'état de sollicitation du point où débute la fissure est représenté par l'abscisse

$$\mu_{réel} = \frac{\sigma_{min.} + \sigma_{résid.}}{\sigma_{max.} + \sigma_{résid.}} \quad \text{et par l'ordonnée} \quad \sigma_{max.} + \sigma_{résid.}.$$

μ étant le coefficient de fatigue dû au moment *extérieur* sollicitant la poutre ($\mu = 0{,}1$ dans le cas de nos expériences);

$$\mu_{réel} = \frac{0{,}1\,\sigma_{max.} + \sigma_{résid.}}{\sigma_{max.} + \sigma_{résid.}}.$$

A partir de la connaissance de l'effet d'entaille de l'assemblage, la théorie de M. STÜSSI permet d'établir une relation entre μ et $\sigma_{max.}$; nous avons *postulé* que cette relation est la même que celle qui relie $\mu_{réel}$ et $\sigma_{max.} + \sigma_{résid.}$ soit $f(\mu_{réel}, \sigma_{max.} + \sigma_{résid.}) = 0$.

Cette relation et l'expression de $\mu_{réel}$ permettent de déterminer $\sigma_{max.}$ et $\mu_{réel}$ à partir des valeurs connues de $\sigma_{resid.}$ et de μ.

Cette détermination est traduite en diagramme sur la fig. 16 où sont tracées:

— La courbe $f(\mu, \sigma_{max.}) = 0$ supposée identique à $f(\mu_{réel}, \sigma_{max.} + \sigma_{résid.}) = 0$ pour un effet d'entaille φ_{e-1} que, l'expérience aidant ainsi que la connaissance

des résultats d'essais entrepris à l'étranger, nous avons pris égal à 0,5 pour l'assemblage étudié.

— Les courbes $\sigma_{max.} + \sigma_{résid.} = f(\mu_{réel})$ pour σ résiduelle constante et pour $\mu = 0{,}1$ (condition de l'essai); ces courbes sont données par

$$\mu_{réel} = \frac{0{,}1\ \sigma_{max.} + C^{ste}}{\sigma_{max.} + C^{ste}}$$

(courbes en pointillé de la fig. 16).

— Les courbes $\sigma_{max.} + \sigma_{résid.} = f(\mu_{réel})$ pour $\sigma_{max.}$ constante et pour $\mu = 0{,}1$; ces courbes sont données par

$$\mu_{réel} = \frac{0{,}1\ C^{ste} + \sigma_{résid.}}{C^{ste} + \sigma_{résid.}}.$$

A la lecture du diagramme de la fig. 16, on peut prévoir la limite d'endurance de l'assemblage envisagé ($\varphi_{e,-1} = 0{,}5$) sollicité à la fatigue ($\mu = 0{,}1$) si on connaît la tension résiduelle agissant au point où la fissure a débuté. Soit par exemple $\sigma_{résid.} = 9\,\text{kg/mm}^2$, la courbe $(\sigma_{max.} + \sigma_{résid.})$ correspondant à $\sigma_{résid.} = 9\,\text{kg/mm}^2$ coupe la courbe $f(\mu, \sigma_{max.}) = 0$ au point M représentatif du comportement réel de l'assemblage pour lequel $\sigma_{max.} + \sigma_{résid.} = 18\,\text{kg/mm}^2$ et $\mu_{réel} = 0{,}55$.

Ce point M se trouve sur la courbe correspondant à $\sigma_{max.} = 9\,\text{kg/mm}^2$, valeur de la limite d'endurance cherchée et résultant de l'effort extérieur pour $\mu = 0{,}1$.

Ce diagramme particulièrement précieux même s'il ne donnait que des indications de principe, permet en outre les deux observations suivantes:

1. Les limites d'endurance dues aux charges extérieures, sont fortement influencées par les tensions résiduelles. On voit qu'une tension résiduelle de traction de 20 kg/mm² abaisse la limite d'endurance de 12,5 à 7,5 kg/mm² (27,5 – 20), une tension résiduelle de compression de 10 kg/mm² la relève de 12,5 à 18 kg/mm² [8 – (– 10)].

2. Un accroissement de tension résiduelle influence d'autant plus la limite d'endurance due aux charges extérieures que la tension résiduelle est faible.

$\sigma_{résiduelle}$ kg/mm²	limite d'endurance kg/mm²	
0	12,5	
7,5	9,5	(17 – 7,5)
15,0	8	(23 – 15)

Il y a lieu, en terminant d'insister sur le fait que ce diagramme donne surtout des indications précieuses certes, mais que son caractère reste malgré tout subjectif par suite de l'incertitude qui pèse sur la valeur réelle de l'effet d'entaille à l'endroit où s'amorce la rupture.

En tenant compte des tensions résiduelles mesurées et des tensions calculées au moment où la rupture s'est amorcée, on a figuré sur ce diagramme les points A, A', B, B' correspondant aux poutres de chaque type. Cette figuration

malgré son intérêt n'est certainement pas exacte du fait que le coefficient d'entaille φ_{e-1} a été pris arbitrairement et qu'il n'est d'ailleurs pas le même dans le joint avec ouvertures et dans le joint sans ouverture.

En ce qui concerne les points (A) (séquence A) et (B) (séquence B), la figure montre seulement avec certitude et d'une manière qualitative que le point a de l'assemblage crée un effet d'entaille moindre que le point b.

La position des points A' et B' dépend du défaut très localisé à la rencontre des joints soudés d'âme et de semelle, dont la nature peut être très variable d'une éprouvette à l'autre.

Résumé

Après un rappel au sujet de l'importance de la détermination de la résistance à la fatigue des assemblages soudés, l'auteur expose les principaux résultats de quelques recherches exécutées aux Laboratoires d'Essais des Constructions du Génie Civil de l'Université de Liège, dans le but d'abréger le délai d'exécution des essais de fatigue sur de tels joints et de pouvoir ainsi plus rapidement élaborer un dimensionnement en fatigue des constructions soudées.

Les théories et les méthodes suivantes, résumées dans cet article, ont été successivement contrôlées par des essais:

1. La théorie de M. le Professeur Stüssi qui permet à l'aide de quelques essais, la détermination de la courbe de Wöhler.
2. La méthode de Locati, basée sur le critère de Miner, qui conduit à une limite de fatigue à l'aide d'une seule éprouvette.
3. L'utilisation d'éprouvettes spéciales comportant trois ou quatre tronçons soudés de largeurs différentes.

La deuxième partie de la communication est consacrée à l'influence des tensions résiduelles sur le comportement en fatigue des assemblages soudés, leur rôle étant mis en évidence et expliqué dans le cas du soudage en bout de deux poutrelles en double té.

Zusammenfassung

Nachdem der Verfasser erneut die Bedeutung der Bestimmung der Dauerfestigkeit geschweißter Stöße hervorgehoben hat, beschreibt er die wichtigsten Ergebnisse einiger an den Laboratoires d'Essais des Constructions du Génie Civil der Universität von Liège durchgeführten Untersuchungen. Diese Untersuchungen hatten den Zweck, die Versuchsdauer an solchen Stößen zu reduzieren und dadurch eine raschere Bestimmung der Bemessung geschweißter Stöße auf Dauerfestigkeit zu erlauben.

Die folgenden, in diesem Beitrag zusammengefaßten Theorien und Methoden wurden durch Versuche nachgeprüft:

1. Die Theorie von Prof. STÜSSI, die auf Grund einiger Versuche erlaubt, die Wöhlerkurve zu bestimmen.
2. Die Methode von Locati, die — basierend auf der Hypothese von Miner — die Bestimmung der Dauerfestigkeit mit Hilfe einer einzigen Probe erlaubt.
3. Die Verwendung von Spezialproben mit drei oder vier geschweißten Abschnitten verschiedener Breite.

Der zweite Teil des Beitrages befaßt sich mit dem Einfluß der Eigenspannungen auf das Dauerfestigkeitsverhalten geschweißter Stöße, wobei deren Bedeutung gezeigt und am Beispiel eines Stumpfstoßes eines Doppel-T-Profiles erläutert wird.

Summary

After recalling the importance of the determination of the fatigue strength of welded assemblies, the author reports the principal results of research work undertaken in the Laboratoires d'Essais des Constructions du Génie Civil (Laboratories for Testing Civil Engineering Constructions) of the University of Liège, for the purpose of shortening the time required for carrying out fatigue tests on such joints and of thus being in a position to work out more rapidly a fatigue design for welded constructions.

The following theories and methods, which are summarised in this article, were successively verified by tests:

1. The theory due to Professor STÜSSI which makes it possible to determine Wöhler's curve by means of a few tests.
2. The method proposed by Locati, based on Miner's criterion, which gives a fatigue limit by means of a single test-piece.
3. The use of special test-pieces comprising three or four bars of different widths welded together.

The second part of the paper is devoted to the effect of the residual stresses on the fatigue behaviour of welded assemblies, the part played by such stresses being demonstrated and explained in the case of the butt-welding of two small beams in a double T.