

# Recherches dans le domaine de la fatigue

## 1. Introduction

Une détérioration par fatigue des éléments d'une structure peut intervenir quand ils sont soumis à des charges fréquemment répétées, même si les contraintes maximales restent largement inférieures à la limite élastique

PAR VÉRONIQUE DUBOIS,  
JEAN-FRANÇOIS RICCI ET  
PETER TANNER,  
LAUSANNE

du matériau. Des dégâts apparaissent sous la forme de fissures caractéristiques en certains points particuliers de ces éléments (fig. 1).

Les constructions métalliques du génie civil pouvant être sensibles à la

fatigue sont essentiellement les ouvrages d'art tels que les ponts-rails et les ponts-routes ou les engins de levage, ainsi que toute autre structure soumise à des charges mobiles importantes et fréquemment répétées.

Afin de vérifier la sécurité de telles structures, il est nécessaire d'établir expérimentalement leur résistance à la fatigue sur des éléments comportant des détails de construction réels. Ces derniers sont en effet à préférer aux éprouvettes de petites dimensions, car ils permettent de prendre en compte la présence d'anomalies ou de manque d'homogénéité dans le matériau et de discontinuités géométriques introduites par les détails de construction, ainsi que des contraintes résiduelles qui peuvent être importantes selon le mode de fabrication des éléments.

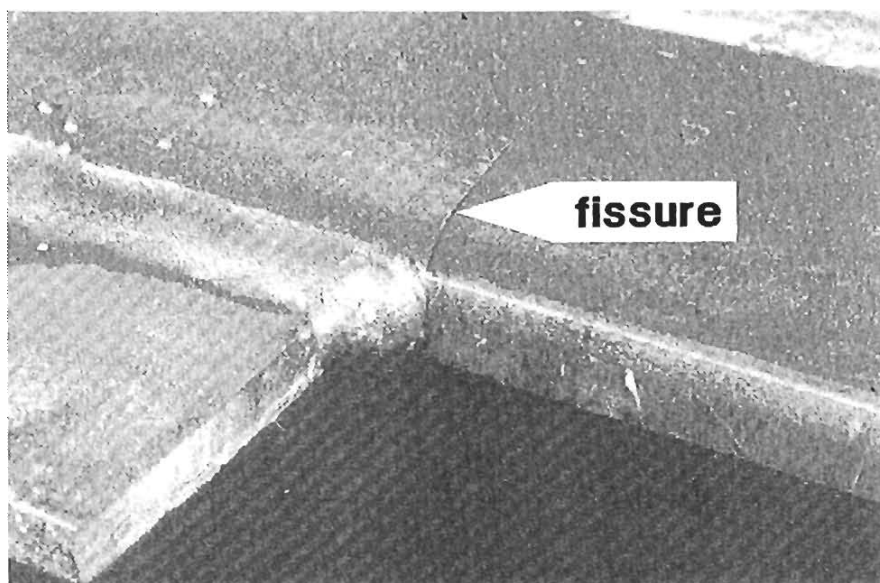


Fig. 1. - Fissure de fatigue au droit d'un gousset soudé à l'aile d'une poutre.

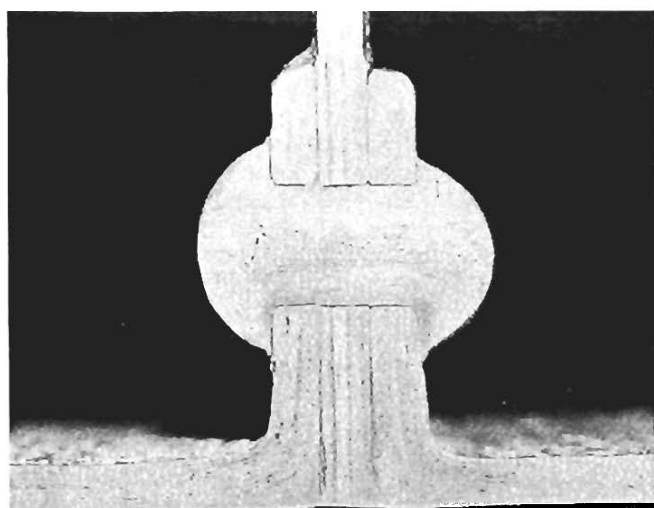


Fig. 2. - Macrographie d'un assemblage riveté montrant la texture feuilletée et les inclusions du fer puddlé.

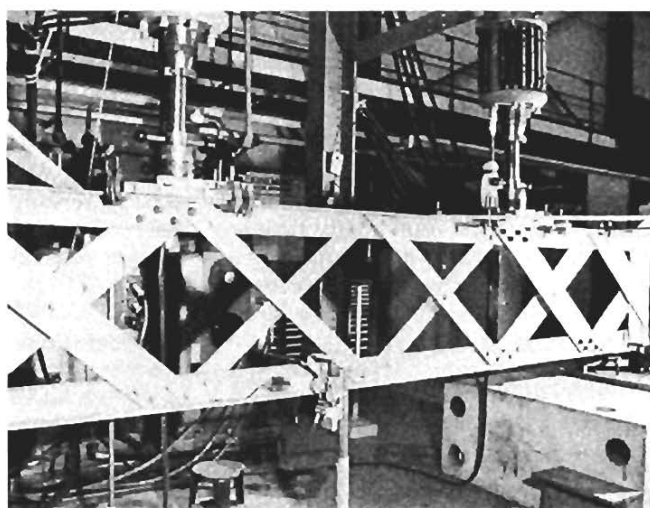


Fig. 3. - Essais effectués sur des entretoises en forme de poutres à treillis double en fer puddlé.

Des essais sont indispensables à plus d'un titre. En effet, les résultats que l'on peut en tirer permettent, d'une part, d'estimer la durée de vie restante d'anciens ouvrages encore en service, et cela afin d'adopter une politique de maintenance cohérente. D'autre part, ils sont également nécessaires pour intégrer dans la conception des structures le recours de plus en plus fréquent à des aciers à haute résistance et à des assemblages soudés.

Dans cet article, nous avons choisi de présenter les deux principaux sujets de recherche relatifs à la fatigue. Il s'agit de la résistance à la fatigue des constructions rivetées (chapitre 2) et des traitements d'amélioration des soudures (chapitre 3).

## 2. Résistance à la fatigue des constructions rivetées

### 2.1. Introduction

Le développement du réseau des chemins de fer à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle a eu pour conséquence la construction d'un grand nombre de ponts métalliques. D'abord réalisés en fer puddlé, les éléments constituant ces ouvrages furent peu à peu exécutés en acier doux dès le début des années 1900. Ils étaient assemblés entre eux à l'aide de rivets (fig. 2), seul moyen d'assemblage utilisé jusqu'à l'apparition des boulons ou de la soudure.

Jusqu'à nos jours, ces ouvrages ont vu les charges de trafic augmenter considérablement, et le système statique de certains d'entre eux a même été modifié à cause de renforcements exécutés ultérieurement. De ce fait, il est devenu nécessaire de vérifier la sécurité de ces ponts et d'estimer leur durée de vie restante. De telles informations sont en effet indispensables pour savoir s'ils doivent être renforcés, voire même remplacés, ou s'ils peuvent être sans autre maintenus en service. Dans ce dernier cas, il faut alors pouvoir fixer

des intervalles d'inspection cohérents avec le type d'ouvrage en question. Du point de vue de la recherche, on ne porta pendant longtemps que peu d'attention au comportement à la fatigue des assemblages rivetés, car les contraintes admissibles très faibles limitaient automatiquement les sollicitations en service. Mais il y a environ cinquante ans, et après quelques accidents survenus à de telles structures, des essais ont été entrepris dans plusieurs pays.

**2.2. Essais effectués à l'ICOM**

Les études expérimentales réalisées au sein de l'ICOM étaient motivées par deux constatations principales: d'une manière générale, seuls des détails de dimensions réduites avaient été testés, et de plus avec des différences de contraintes  $\Delta\sigma$  relativement élevées. En faisant intervenir un très grand nombre de cycles de charge, appliqués sur des éléments en vraie grandeur, le but de ces essais était donc de proposer des courbes de résistance à la fatigue pouvant être appliquées à un détail riveté donné.

Dans ce sens, quatre études expérimentales ont été entreprises à l'ICOM:

- Essais de fatigue sur des éléments d'une membrure rivetée d'un pont-rail en fer puddlé (1882), desquels furent prélevées 14 éprouvettes de géométrie différente [1]<sup>1</sup>.
- Essais de fatigue sur 6 entretoises à âme pleine provenant d'un pont riveté en fer puddlé (1884) [2].
- Essais sur des entretoises en forme de poutres à treillis double en fer puddlé (fig. 3) provenant d'un pont-route en arc à trois articulations (1891) [3].
- Essais sur des poutres en acier doux (1935), initialement prévues pour des ponts-rails de secours. Elles étaient constituées d'un profilé (HEB 1000) et d'une semelle de renfort liée à l'aile supérieure par des rivets [4].

**2.3. Synthèse des résultats d'essais**

Un des buts recherchés était de déterminer à quelle courbe de fatigue de la norme SIA 161 les détails rivetés correspondent le mieux. Du point de vue de leur résistance à la fatigue, la courbe D en donne une description conservatrice quand on se base sur la section nette pour le calcul des contraintes. Dans certains cas, et notamment pour de faibles différences de contraintes, la courbe C est aussi applicable [3] [4] (fig. 4).

Ces séries d'essais ont également permis d'approfondir la connaissance du comportement à la fatigue d'éléments rivetés. On a ainsi pu constater que la fissure se développait généralement à partir du bord des trous des rivets, du fait des défauts introduits lors de leur mise en place ou au moment du perçage des trous. Elles ont par ailleurs confirmé que la corrosion n'entraîne pas une probabilité plus élevée quant à l'apparition d'une fissure de fatigue. Cette étude a aussi été l'occasion de mettre l'accent sur l'importance de l'inspection des ouvrages. Il est en effet urgent d'intervenir dès qu'une fissure devient visible, car sa dimension est généralement déjà importante et sa vitesse de propagation augmente alors très rapidement. Pour éviter cette progression, le percement d'un trou de diamètre adéquat au front de la fissure peut déjà se révéler suffisant. La pose d'un boulon précontraint permet en plus d'empêcher la reprise rapide de la fissuration. Pour une réparation durable, on préférera cependant renforcer la section affaiblie au moyen de couvre-joints fixés par des boulons précontraints. Des réparations par souderie sont en revanche généralement à éviter, du fait que l'on tombe alors dans des catégories de résistance à la fatigue beaucoup plus défavorables.

par les effets du soudage. Ainsi, ces assemblages subissent souvent des dommages dus à la fatigue si la structure est soumise à de fréquentes charges variables.

Dans la construction métallique, on utilise de plus en plus des matériaux à haute résistance pour économiser de la matière. Dans ce cas, les sollicitations dues aux charges de service sont plus élevées, ce qui a pour conséquence que des fissures de fatigue apparaissent plus facilement. En effet, la résistance à la fatigue d'assemblages soudés n'augmente pas avec la résistance ultime du matériau.

Pour pouvoir profiter de cette résistance, il faut tout d'abord concevoir les assemblages de manière réfléchie (essentiellement en éliminant des soudures discontinues et des changements brusques de section), afin de rendre la construction peu sensible à la fatigue. Si des discontinuités de soudage sont inévitables et si une réduction des contraintes n'est pas souhaitable, on peut soumettre la soudure à un traitement ayant pour but d'augmenter la résistance à la fatigue de l'assemblage [6] [7]. Quelques-uns de ces traitements sont présentés dans ce chapitre.

Il est indispensable de pouvoir déterminer l'augmentation de la durée de vie due à un traitement. Jusqu'à maintenant, seuls des essais en laboratoire sur des éléments en vraie grandeur permettent de le faire. Les résultats ainsi obtenus ne sont alors valables que pour l'éprouvette utilisée et les charges appliquées. Pour des applications courantes, une telle procédure est bien évidemment trop coûteuse; c'est pourquoi les traitements d'amélioration ne seront pas largement utili-

**3. Traitements d'amélioration**

**3.1. Introduction**

Un assemblage représente dans une structure métallique une discontinuité qui provoque une concentration de contraintes. Dans le cas d'un assemblage soudé, les conséquences de cette concentration sont encore aggravées

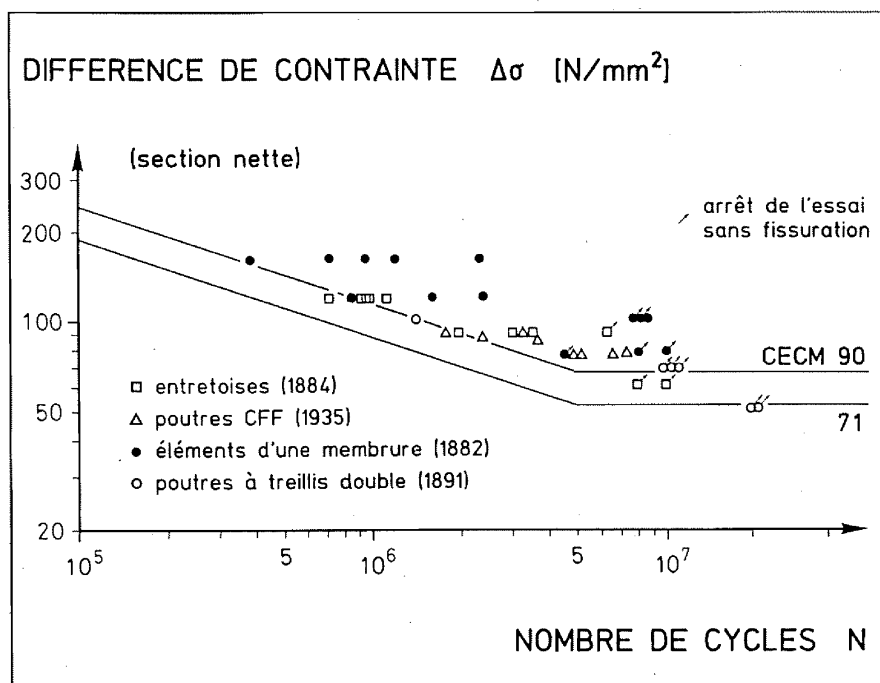


Fig. 4. - Résultats des essais effectués à l'ICOM [2] [5].

<sup>1</sup>Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

sés tant que l'on ne pourra pas estimer leurs effets de façon analytique. L'objectif de la recherche est donc le développement d'un modèle de calcul dans le but de prédire les effets de tels traitements d'amélioration.

### 3.2. Méthodes de traitement

#### a) Généralités

Il est possible de distinguer deux catégories de traitements visant à augmenter la résistance à la fatigue d'assemblages soudés [8]:

- d'une part, les traitements qui interviennent sur la forme de la soudure afin de réduire la concentration des contraintes (par exemple le meulage, le fraisage, la refonte TIG, etc.); ils enlèvent du matériel pour diminuer les défauts initiaux et créer ainsi un flux progressif des contraintes;
- d'autre part, les traitements qui interviennent sur le champ des contraintes résiduelles au pied du cordon de soudure (par exemple le martelage, le grenailage, le chauffage ponctuel, etc.); ils créent des contraintes résiduelles de compression à l'endroit où le soudage avait introduit des contraintes résiduelles de traction.

#### b) Choix des méthodes de traitement

Des études préliminaires [9] ont montré lesquelles des méthodes existantes méritent d'être étudiées plus en détail grâce à leurs applications multiples et relativement simples dans des constructions métalliques traditionnelles. Pour faire ce choix, les aspects suivants ont été considérés:

- l'efficacité du traitement, c'est-à-dire l'augmentation de la durée de vie de l'assemblage
- le coût du traitement
- la difficulté de réalisation du traitement
- la possibilité de contrôler la qualité du traitement, ce qui est important

pour qu'on puisse être sûr que l'amélioration prévue est atteinte et que ses effets sont toujours actifs après la mise en service de l'ouvrage et pendant toute sa durée de vie.

Il s'agit d'ailleurs des mêmes critères entre lesquels l'ingénieur praticien doit trouver un compromis, dans le but d'évaluer la méthode adéquate pour augmenter la durée de vie d'un assemblage particulier.

Dans les études préliminaires mentionnées ci-dessus, on a constaté que les méthodes d'amélioration consistant à créer une zone de contraintes résiduelles de compression se révèlent les plus économiques. En revanche, des méthodes utilisant le meulage ou le fraisage sont plus coûteuses.

Les principales caractéristiques de quatre traitements sont présentées ci-dessous. Des informations complémentaires se trouvent dans [6] à [10].

**Refonte TIG:** La refonte par le procédé TIG (Tungsten Inert Gas, soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode en tungstène) est une méthode qui cherche à modifier la forme des parties de la soudure et de la zone thermiquement affectée du fer plat de base qui présentent des discontinuités. Une électrode non consommable est utilisée pour refondre le pied du cordon.

Pour les essais effectués à l'ICOM, chaque éprouvette a été grenailée avant le traitement, ce qui est nécessaire afin d'obtenir une refonte propre.

**Martelage au burin:** Le métal autour du pied du cordon est frappé perpendiculairement par un pistolet pneumatique muni d'un burin (fig. 5). Le burin utilisé pour les études à l'ICOM provoquait une marque de  $3 \times 15$  mm au pied du cordon. Quatre passes ont été effectuées en utilisant le pistolet avec une pression d'air de 6 bar. La vitesse de déplacement du burin lors de la frappe était d'environ 10 mm/s. Des études antérieures [11] [12] ont montré que des passes additionnelles ou une augmen-

tation de la pression d'air ne donnaient pas d'amélioration supplémentaire.

**Martelage avec aiguilles:** On déforme le matériau au pied du cordon en le martelant à l'aide d'un pistolet muni de 12 aiguilles à bout arrondi d'environ 2 mm de diamètre (fig. 6). Comme le martelage au burin, ce traitement a été réalisé pour les essais en 4 passes, à une vitesse de 10 mm/s et sous une pression d'air de 6 bar. Le pistolet mentionné est du type utilisé par les soudeurs pour enlever les scories, et il est donc disponible dans la plupart des ateliers.

**Grenailage:** Le grenailage peut se faire soit dans une grande installation automatique à turbines utilisée pour des tôles ou, encore mieux, à l'aide d'une petite installation ad hoc. Pour les essais, les éprouvettes ont été soumises à deux passes de grenailage (aller et retour) avec une vitesse de 1,3 m/min. La grenaille ronde en acier (S330) avait un diamètre nominal de 0,8 mm et une dureté Rockwell C entre 46 et 51. La vitesse de la grenaille à la sortie des turbines était d'environ 80 m/s.

### 3.3. Essais effectués à l'ICOM

Afin d'établir un modèle de calcul pouvant prédire la durée de vie d'un assemblage soudé soumis à des cycles de fatigue ou de pouvoir tenir compte de l'effet d'un traitement d'amélioration, il est nécessaire d'analyser le comportement des fissures [10].

Pour cette étude expérimentale, deux détails de construction ont été choisis dans des catégories de faible résistance à la fatigue. Dans ce cas, un traitement d'amélioration devient en effet très intéressant, d'autant plus que ces détails sont très souvent utilisés dans la pratique. Les éprouvettes étaient constituées d'un fer plat de 1 m de long et de section de  $130 \times 20$  mm. De part et d'autre de la plaque, des goussets de respectivement 200 et 100 mm de long

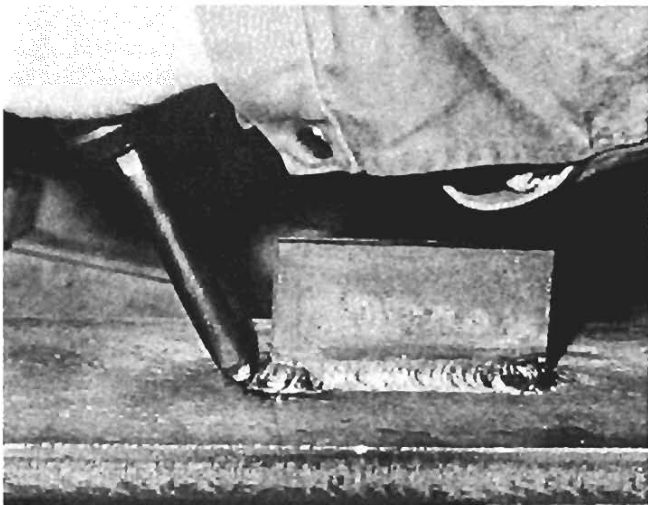


Fig. 5. - Traitement par martelage au burin.

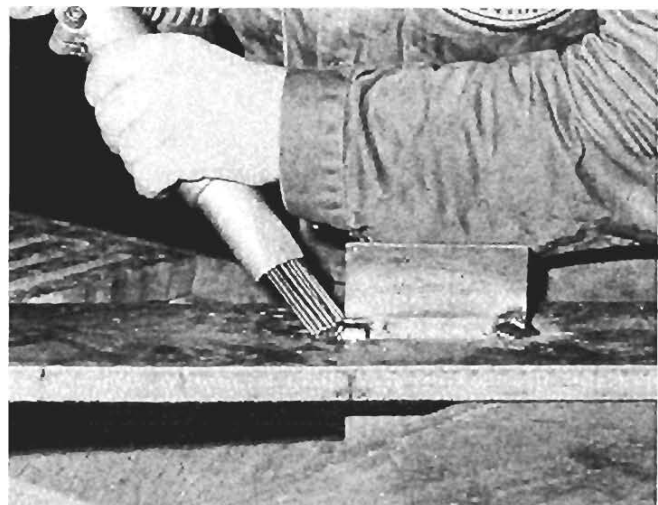


Fig. 6. - Traitement par martelage avec aiguilles.

ont été soudés afin d'examiner l'influence de la longueur des goussets. Les éprouvettes ont été placées dans les mâchoires d'une machine servo-hydraulique (fig. 7) d'une capacité dynamique de  $\pm 800$  kN. Elles ont alors été soumises à des charges de fatigue d'amplitude constante.

Le comportement d'une fissure est en premier lieu caractérisé par sa profondeur  $a$  en fonction du nombre de cycles  $N$ , ainsi que par le taux de propagation  $da/dN$  qui en découle. Pour déterminer cette profondeur, un système de mesure basé sur la variation d'un champ électrique provoqué par le développement d'une fissure a été utilisé [13] [14].

Pour modéliser l'effet d'un traitement agissant en premier lieu sur le champ des contraintes résiduelles, il est nécessaire de connaître ces dernières sur le chemin présumé de la fissure. Pour cela, des mesures de contraintes résiduelles ont été effectuées à l'aide de la méthode de la diffractométrie X. La méthode utilisée ainsi que les résultats obtenus sont présentés dans [15]. Des études récentes [16] [17] ont mis en évidence l'existence d'une relation plus étroite entre le taux de propagation de la fissure et la différence efficace des facteurs d'intensité de contrainte  $\Delta K_{eff}$ . Cette dernière englobe directement l'effet du champ des contraintes résiduelles sur le comportement et le taux de propagation de la fissure [18]. Cette différence efficace est définie pendant la partie du cycle de charge où la fissure est complètement ouverte et ainsi susceptible de faire

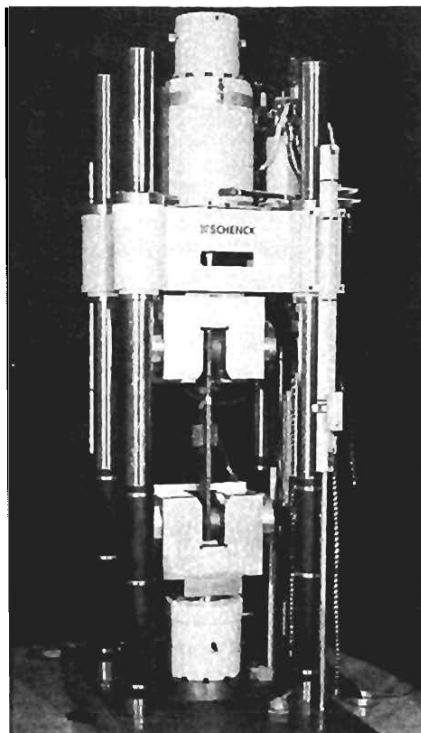


Fig. 7. - Machine servohydraulique avec éprouvette testée; longueur de l'éprouvette: 1 m.

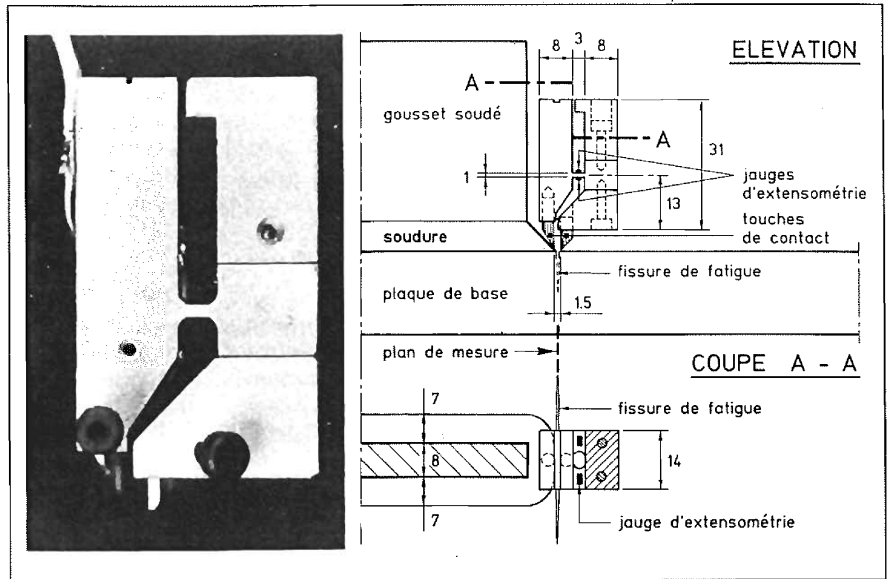


Fig. 8. - Extensomètre pour la détermination de la contrainte d'ouverture et emplacement de mesure (dimensions en mm).

propager la fissure. Pour déterminer l'ouverture de la fissure, un extensomètre approprié (fig. 8) a été développé [19]. Cet instrument mesure à cheval sur la fissure l'allongement de la matière en surface. En effet, la relation entre la contrainte appliquée et cet allongement est différente selon que la fissure est ouverte ou fermée. Ces essais ont ainsi permis de mettre en évidence le comportement de fissures de fatigue dans des assemblages soudés bruts et traités.

**3.4. Synthèse des résultats d'essais**

Ces essais ont été effectués dans le cadre d'une thèse de doctorat [10] dont quelques résultats sont résumés ci-dessous. On a d'abord pu constater une augmentation de la durée de vie des éprouvettes traitées. Cette amélioration est de l'ordre de 100% pour les assemblages traités par grenaillage et par martelage avec aiguilles et de l'ordre de 400% pour les assemblages traités par martelage au burin. Cette dernière méthode a d'ailleurs donné d'excellents résultats et s'est ainsi révélée comme étant la plus efficace. Cette augmentation de la durée de vie a pu être expliquée par les résultats relatifs au taux de propagation. On a ainsi pu constater qu'elle est due à un ralentissement de la propagation des fissures et non pas à une augmentation d'une éventuelle urée d'initiation. En effet, dans les 56 cas examinés, le nombre de cycles avant détection de la fissure est en moyenne égal à 6% de la durée de vie totale et dans tous les cas inférieur à 20%.

Ces résultats ont également suggéré un modèle de calcul basé sur la différence efficace des facteurs d'intensité de contrainte  $\Delta K_{eff}$  pour la prévision du taux de propagation  $da/dN$ . La figure 9

donne les lois de propagation admises dans ce modèle ainsi que les résultats expérimentaux.

A l'aide d'autres recherches, un modèle pour la prévision de la durée de vie d'assemblages soudés traités a pu être proposé [10]. Cependant, ce dernier devra encore être vérifié sur d'autres types d'éprouvettes et sous charge d'amplitude variable.

**4. Conclusions**

A l'heure actuelle, un grand nombre d'ouvrages d'art arrivent à la fin ou ont même déjà dépassé leur durée de service prévue. Compte tenu de l'augmentation des trafics routier et ferroviaire, il devient dès lors essentiel d'estimer leur durée de vie restante pour adopter une politique de maintenance cohérente. Ainsi, afin de connaître le comportement à la fatigue d'éléments rivetés, plusieurs séries d'essais ont été

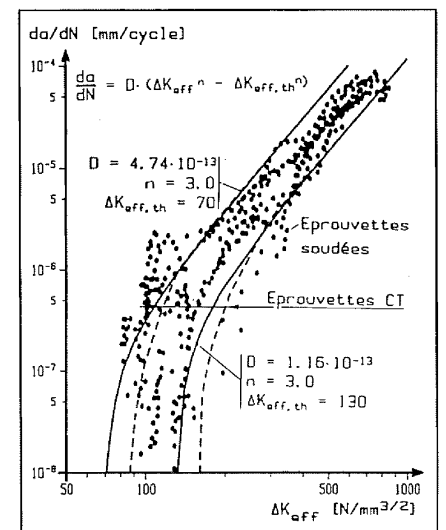


Fig. 9. - Lois de propagation admises dans le modèle et comparaison avec les résultats expérimentaux [10].

### Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier vivement le professeur M. A. Hirt qui dirige l'ensemble des recherches dans le domaine de la fatigue à l'ICOM. Cet article rend compte des études effectuées dans le cadre d'un institut par une équipe que les auteurs tiennent également à remercier. D'autre part, c'est grâce aux très bons équipements de laboratoire que fournit l'EPFL que ces recherches ont pu être entreprises. Nos remerciements vont également aux organismes qui soutiennent ou ont soutenu nos recherches. Il s'agit notamment du Fonds national suisse de la recherche scientifique, des Chemins de fers fédéraux, de l'Office fédéral des routes et de l'Office fédéral des transports. Nous remercions aussi le secteur privé pour l'intérêt qu'il nous a manifesté.

entreprises à l'ICOM. Elles ont permis, d'une part, de classer les éléments rivetés par rapport aux courbes de résistance à la fatigue de la norme SIA 161 (1979) et, d'autre part, de faire des observations sur le comportement et sur l'effet de réparations effectuées sur des ouvrages présentant des fissures. Un autre volet de la recherche à l'ICOM concerne les assemblages soudés. Dans les cas où il n'est plus possible - ou peu économique - d'exécuter des assemblages où le flux des contraintes est peu perturbé, un moyen important d'améliorer la résistance à la fatigue réside dans les traitements d'amélioration. Une première étude a été entreprise dans le but de faire un inventaire des avantages et inconvénients des différentes méthodes existantes. Quelques-unes d'entre elles, notamment celles agissant favorablement au niveau des contraintes résiduelles, ont ainsi pu être retenues pour une deuxième phase d'étude. Des systèmes de mesure performants, destinés à suivre l'évolution de la profondeur de la fissure et de la contrainte d'ouverture, ont été développés et appliqués. Les résultats de ces essais ont mis en évidence l'efficacité de la méthode du martelage au burin, qui permet d'augmenter la durée de vie d'un assemblage soudé d'environ 400%.

Ces investigations constituent également un point de départ pour différen-

### Bibliographie

- [1] SBB-GD, ABTEILUNG BRÜCKENBAU: *Schweisseiserne Brücken. Teil 4: Ermüdungsfestigkeit*, CFF, Bern, 1979.
- [2] BRÜHWILER, E.; BEZ, R.; HIRT, M. A.: «Résistance à la fatigue des constructions rivetées», *Ingénieurs et architectes suisses*, vol. 111, N° 1/2, Lausanne, 1985, pp. 3-6.
- [3] BRÜHWILER, E.: *Essais de fatigue sur des poutres à treillis double en fer puddlé*, EPFL, Lausanne, 1986 (publication ICOM 159).
- [4] RABEMANANTSOA, H.; HIRT, M. A.: *Comportement à la fatigue de profilés laminés avec semelles de renfort rivetées*, EPFL, Lausanne, 1984 (publication ICOM 133).
- [5] BRÜHWILER, E.; HIRT, M. A.: «Das Ermüdungsverhalten genieteter Brückenbauteile», *Stahlbau*, vol. 56, N° 1, Berlin, 1987, pp. 1-8.
- [6] HIRT, M. A.; BREMEN, U.; SMITH, I. F. C.: «Modèles de prévision et amélioration de la durée de vie d'éléments en acier soudés», *Material + Technik*, vol. 13, N° 1, Dübendorf, 1985, pp. 28-35.
- [7] SMITH, I. F. C.; BREMEN, U.: «Cinq traitements visant à augmenter la résistance à la fatigue d'assemblages soudés», *Technica*, vol. 34, N° 15/16, Bâle, 1985, pp. 39-44.
- [8] SMITH, I. F. C.; HIRT, M. A.: «A review of fatigue strength improvement methods», *Revue canadienne de génie civil*, vol. 12, N° 1, Ottawa, 1985, pp. 166-183.
- [9] BREMEN, U.; SMITH, I. F. C.; MUSTER, W. J.: «Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit geschweisster Verbindungen», *Material + Technik*, vol. 12, N° 3, Dübendorf, 1984, pp. 73-82.
- [10] BREMEN, U.: *Amélioration du comportement à la fatigue d'assemblages soudés: étude et modélisation de l'effet de contraintes résiduelles*, thèse 787, EPFL, Lausanne, 1989.
- [11] FISHER, J. W.; PENSE, A. W.; SULLIVAN, M. D.; HAUSAMANN, H.: *Detection and repair at fatigue damage in welded Highway bridges*, NCHRP Report No. 206, Highway Research Board, USA, 1981.
- [12] KNIGHT, J. W.: «Improving the fatigue strength of fillet-welded joints by grinding and peening», *Welding Research International*, vol. 8/1978, pp. 519-540.
- [13] SMITH, I. F. C.; SMITH, R. A.: «Measuring fatigue cracks in fillet-welded joints», *International Journal of Fatigue*, vol. 4., Guildford, 1982, pp. 41-45.
- [14] DUBOIS, V.; BREMEN, U.: *Détermination de la profondeur de fissures de fatigue à l'aide d'un champ électrique*, EPFL, Lausanne, 1988 (publication ICOM 202).
- [15] BREMEN, U.: *Détermination des contraintes résiduelles au pied de cordons de soudure bruts ou traités*, EPFL, Lausanne, 1987 (publication ICOM 188).
- [16] FLECK, N. A.: *An investigation of fatigue crack closure*, thèse de doctorat, Cambridge University, 1984.
- [17] VERREMAN, Y.: *Comportement en fatigue des joints soudés automatiques*, thèse de doctorat, Université de Montréal, 1985.
- [18] BREMEN, U.; SMITH, I. F. C.; HIRT, M. A.: «Crack growth behaviour in a welded joint improved by residual-stress methods», *Fatigue of Welded Constructions*, Brighton, UK, 1987. Cambridge, The Welding Institute, 1987.
- [19] BREMEN, U.: *Détermination de la contrainte d'ouverture de fissures de fatigue au pied de cordons de soudure*, EPFL, Lausanne, 1988 (publication ICOM 200).

tes recherches ayant toujours comme but de rester proches de l'industrie et de la pratique. Ces études concernent par exemple la durée de vie restante des ponts, le comportement sous amplitude variable des assemblages soudés traités, le comportement d'assemblages soudés en aluminium, ainsi que les systèmes experts liés au dimensionnement à la fatigue ou à la maintenance.

### Adresse des auteurs:

Véronique Dubois, ing. dipl. EPFL/SIA  
Jean-François Ricci, ing. dipl. EPFL  
Peter Tanner, ing. dipl. EPFZ  
Ecole polytechnique fédérale de Lausanne  
ICOM - Construction métallique  
GC - Ecublens  
1015 Lausanne