

La résistance à la fatigue
des poutres en âme pleine composées - soudées

EFFET DES PLAQUETTES ET GOUSSETS SOUDES A L'AILE

M. A. Hirt et M. Crisinel

Avec l'appui de :
CHEMINS DE FER FEDERAUX (CFF)
UNION DES ENTREPRISES SUISSSES DE
TRANSPORTS PUBLICS (UST)

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Département de Génie Civil



INSTITUT DE LA CONSTRUCTION MÉTALLIQUE

9, ch. des Délices

1006 Lausanne

LA RESISTANCE A LA FATIGUE DES POUTRES EN AME PLEINE
COMPOSEES-SOUDEES
EFFET DES PLAQUETTES ET GOUSSETS SOUDES A L'AILE

MANFRED A. HIRT

MICHEL CRISINEL

Rapport d'essais

ICOM 017

Décembre 1975

SYNOPSIS

Im Rahmen der Arbeiten des Instituts für Stahlbau (ICOM) der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Lausanne wurde die Ermüdungsfestigkeit von Vollwandträgern untersucht, im besonderen wurde der Einfluss von Quersteifen und Knotenblechen bestimmt. Diese Studie ist Teil einer Untersuchung, die ein umfassendes Konzept zur Bestimmung des Ermüdungsverhaltens von Brücken definieren will.

Der Anstoss zu dieser Studie basiert auf der Tatsache, dass die heutigen Normvorschriften der Schweiz (SIA 161 - 1974) oder Europas den neueren Kenntnissen nicht Rechnung tragen. Im besonderen unterscheiden diese Vorschriften nicht zwischen den verschiedenen Konstruktionsdetails und überschätzen die Ermüdungsfestigkeit von Trägern die mit solchen Details versehen sind. Das Ziel dieser Studie ist somit die Bereitstellung von Versuchsergebnissen, die als Grundlage für eine Revision der Normvorschriften dienen können.

Vierzehn geschweisste Träger in Stahl Fe 510 (St. 36/52) wurden auf Ermüdung getestet, wobei jeder Träger mit zwei Konstruktionsdetails versehen war. Der Versuchsbericht gibt die Lebensdauer in Anzahl Lastwechseln, den genauen Ort der Ermüdungsrisse sowie ihre Wachstumsart für jedes Konstruktionsdetail.

Die Versuchsergebnisse sind im Hinblick auf die praktische Anwendung analysiert und besprochen und erlauben eine Auswahl der Konstruktionsdetails und ihrer Herstellungsart. Die Resultate sind ebenfalls mit anderen Versuchsreihen verglichen: jedes Konstruktionsdetail kann somit zwischen einem oberen und unteren Grenzwert, je nach seiner Lebensdauer, eingeordnet werden. Der obere Grenzwert ist durch den geschweissten Träger ohne jegliche Anschlüsse und der untere Grenzwert durch den lamellenverstärkten Träger gegeben.

Die Schlussfolgerungen dieses Berichtes zeigen eindeutig, dass die Grosszahl von Versuchsergebnissen eine Modifikation der heutigen Vorschriften bezüglich Ermüdungsfestigkeit von geschweissten Stahlkonstruktionen erlaubt.

ABSTRACT

In the framework of research at the Institute for Steel Structures (ICOM) of the Swiss Federal Institute of Technology at Lausanne, this study has been conducted to determine the fatigue strength of welded plate girders. In particular, the effect of transverse stiffeners and of gusset plates has been determined. This study is part of a research program that tries to establish a general concept for the fatigue behavior of bridges.

The motivation of this research is mainly based on the fact that the specifications in Switzerland (Norm SIA 161 - 1974) or in Europe do not reflect actual knowledge. In particular, they make no distinction between different types of structural details and considerably overestimate the fatigue strength of beams containing such details. The goal of the research is therefore to provide the necessary test results for a revision of the specifications.

Fourteen welded I-beams, fabricated of Fe 510 steel (St. 36/52) have been fatigue tested, where every beam contained two welded details. This report describes the fatigue life and the precise location of fatigue cracks, as well as their modes of propagation for each structural detail.

The test results are analyzed and discussed in such a way as to allow a selection between the structural details and their modes of fabrication for practical applications. The results are also compared with other test data; in fact, every structural detail can be situated between an upper and lower bound according to its fatigue life. The upper bound is given by the plain welded beam without attachments and the lower bound is defined by the beam reinforced by a coverplate.

The conclusions of this report show clearly that the great number of test results allow a modification of the actual specifications concerning the fatigue strength of welded steel structures.

RESUME

Dans le cadre des recherches effectuées à l'Institut de la Construction Métallique (ICOM) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, une étude concernant la résistance à la fatigue des poutres en âme plaine composée-soudées a été entreprise, en vue spécialement de déterminer l'effet des raidisseurs munis de plaquettes et des goussets soudés à l'aile. Cette étude fait partie intégrante d'une recherche visant à définir un concept global du comportement à la fatigue des ponts.

La motivation de cette recherche est due au fait que les prescriptions en vigueur en Suisse (Norme SIA 151 - 1974) ou en Europe ne tiennent pas compte des connaissances actuelles. En particulier, elles ne font pas de distinction entre les différents détails constructifs et surestiment considérablement la résistance à la fatigue des poutres munies de tels détails. Le but de ce travail est donc de mettre à disposition des résultats d'essais pouvant servir de base à une révision des spécifications.

Quatorze poutres composées-soudées en acier Fe 510 (Ac. 36/52), munies de deux détails constructifs chacune, ont été fabriquées et essayées à la fatigue. Pour chaque détail constructif, le rapport présente la durée de vie exprimée en nombre de cycles, ainsi que l'emplacement des fissures de fatigue et le mode de propagation de celles-ci.

Les résultats sont analysés et discutés afin d'en tirer les enseignements pratiques concernant le choix et le mode d'exécution des détails constructifs. Ces résultats sont également examinés dans un cadre plus large par comparaison avec des résultats similaires effectués ailleurs : chaque détail constructif peut en effet être situé, en fonction de sa durée de vie entre deux limites extrêmes. La limite supérieure est la résistance à la fatigue de la poutre composée-soudée ne comportant aucun autre détail, la limite inférieure est la poutre composée-soudée avec semelles de renforcement.

Les conclusions de ce rapport montrent clairement qu'un nombre important de résultats d'essais permet de modifier les prescriptions existantes concernant la résistance à la fatigue des constructions métalliques soudées.

TABLE DES MATIERES

1	INTRODUCTION	7
	1.1 Motivation	7
	1.2 But de la recherche	7
	1.3 Résultats existants	9
2	POUTRES D'ESSAIS	10
	2.1 Choix des détails constructifs	10
	2.2 Plan d'expériences et facteurs contrôlés	11
	2.3 Types de poutres	14
	2.4 Détails de fabrication	14
3	DESCRIPTION DES ESSAIS	17
	3.1 Machine d'essais et bâti de charge	17
	3.2 Déroulement des essais	17
4	RESULTATS DES ESSAIS	18
	4.1 Présentation des résultats	18
	4.2 Description des fissures	19
	4.3 Résultats des poutres avec plaquettes	21
	4.4 Résultats des poutres avec goussets	23
	4.5 Comparaison entre plaquettes et goussets	23
5	COMPARAISON AVEC D'AUTRES RESULTATS	26
	5.1 Comparaison avec les poutres composées-soudées	26
	5.2 Comparaison avec les attaches	27
	5.3 Comparaison avec les raidisseurs soudés à l'aile tendue	30
6	CONCLUSIONS	30
	REMERCIEMENTS	32
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	33
	ANNEXE 1 : Présentation des résultats d'essais	34
	ANNEXE 2 : Résumé des résultats selon détails constructifs	36

1 INTRODUCTION

1.1 MOTIVATION

Des effondrements spectaculaires de grands ponts [1], [2] ont nécessité un contrôle systématique des principaux ponts-routes aux Etats-Unis. Ces contrôles ont révélé qu'un grand nombre d'ouvrages métalliques comportaient des fissures de fatigue. Une recherche approfondie s'avérera donc nécessaire pour établir les paramètres principaux influençant le comportement à la fatigue d'un ouvrage d'art.

En effet, la façon de construire a beaucoup évolué ces dernières années. L'accroissement du nombre de constructions entièrement soudées, lié à l'utilisation de plus en plus fréquente d'acier à haute résistance, augmente la probabilité de fissuration par fatigue. Les aciers à haute résistance ne présentent en effet aucune augmentation de résistance à la fatigue malgré des contraintes admissibles plus élevées.

D'autre part, parallèlement à l'augmentation du volume de trafic, on constate un accroissement de la charge utile des véhicules, tant dans le domaine routier que ferroviaire. Ce facteur augmente également la probabilité de formation des fissures de fatigue.

Au vu des résultats d'essais obtenus jusqu'en 1960, on a pu établir une première liste de facteurs influençant la résistance des poutres à la fatigue. Mais c'est seulement en 1970, après un très grand nombre d'essais, que l'on a pu définir à l'Université Lehigh de Bethlehem aux Etats-Unis [3] les paramètres déterminants. Il s'agit essentiellement de la différence de contraintes $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ et du type de détail constructif.

La FIGURE 1 représente graphiquement la durée de vie en fonction de la différence de contraintes $\Delta\sigma$ de deux détails constructifs : la poutre composée-soudée et la poutre avec semelles de renforcement. La ligne moyenne des résultats correspondant à chaque détail est une droite dans la représentation double logarithmique. La droite représentative de la durée de vie de la poutre composée-soudée et celle de la poutre avec semelle de renforcement déterminent respectivement la limite supérieure et la limite inférieure de tous les résultats des différents détails constructifs.

Il convient d'ajouter que les résultats sont indifféremment valables pour un acier doux normal Fe 360 (Ac. 24/37) et pour des aciers à haute résistance, tels que l'acier Fe 510 (Ac. 36/52) ou St. E 70.

La comparaison des résultats avec les valeurs admissibles selon la norme SIA 161 (1974) montre que les prescriptions en vigueur ne satisfont pas les nouvelles connaissances provenant des essais. En particulier, la norme ne tient pas compte du type de détail constructif. Elle surestime aussi considérablement la résistance à la fatigue, spécialement pour les aciers à haute résistance. Par conséquent, l'étude que nous avons entreprise et que nous présentons ici se propose de fournir des résultats d'essais pouvant servir de base à une révision de cette norme.

1.2 BUT DE LA RECHERCHE

L'étude du comportement à la fatigue des poutres composées-soudées a pour but de faire admettre le concept de la différence de contraintes $\Delta\sigma$ et non plus celui du rapport κ entre la contrainte minimale et la contrainte maximale. Elle peut servir également de base à une proposition pour le

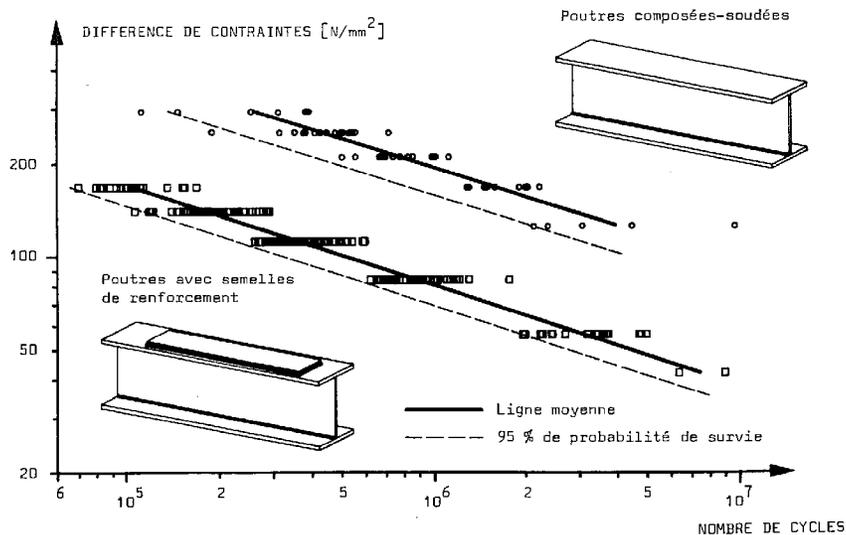


FIGURE 1

Résultats des essais effectués à l'Université Lehigh de Bethlehem, Pennsylvanie (USA).

révision de la norme SIA 161 concernant le calcul et l'exécution des constructions métalliques. A cet effet, il est nécessaire de procéder à l'analyse du comportement à la fatigue de certains détails types que l'on retrouve souvent dans les ponts métalliques en Suisse.

L'étude particulière présentée dans ce rapport concerne l'effet des plaquettes, goussets ou raidisseurs soudés à l'aile tendue d'une poutre en I. Les détails constructifs proposés sont basés sur des plans d'exécution de ponts-rails mis à notre disposition par la Direction Générale des Chemins de Fer Fédéraux (CFF-SBB-FFS) à Berne. Ils ont été choisis de façon à représenter au mieux les exigences et conditions de fabrication suisses. De plus, les poutres ont été conçues de manière à ce que les résultats des essais de fatigue puissent être comparés à des résultats existants de poutres comportant des détails constructifs similaires.

Le chapitre 2 donne de plus amples renseignements concernant le choix des détails constructifs, les paramètres contrôlés et le type de poutre choisi. Il convient de rappeler que les résultats d'essais seront toujours comparés à des résultats existants, en particulier aux limites supérieure et inférieure de la FIGURE 1. Cette démarche est absolument nécessaire pour mettre les résultats de notre recherche dans le cadre général du concept de fatigue.

1.3 RESULTATS EXISTANTS

L'étude présentée ici se base essentiellement sur des résultats résumés dans la référence [4], dont une partie était publiée [3] et une partie accessible [5] au moment de l'élaboration du programme. Rappelons les conclusions principales de ces recherches importantes :

- 1.- L'analyse de variance des résultats a montré que la différence de contraintes $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ est déterminante pour la durée de vie des poutres essayées. Du point de vue statistique, la contrainte minimale ou la contrainte maximale ne sont pas déterminantes.
- 2.- La nuance d'acier n'a pas d'influence significative sur la durée de vie des détails constructifs soudés.
- 3.- Les analyses de variance et de régression ont montré que les résultats d'essais peuvent être représentés par une droite dans un système d'axes $\Delta\sigma - N$ avec échelles logarithmiques.
- 4.- Le type de détail constructif s'est révélé être un facteur déterminant. Les deux lignes de la FIGURE 1 définissent deux valeurs extrêmes qui limitent une bande dans laquelle sont contenus tous les résultats d'essais des différents types de détails.

En particulier, la longueur d'une attache soudée à l'aile tendue est d'une importance déterminante, comme le montre la FIGURE 2. Par exemple, la ligne moyenne d'une attache de 50 mm seulement tombe à mi-distance entre les deux bornes extrêmes définies ci-dessus. Plus l'attache est longue et par conséquent peut développer sa capacité portante, plus elle réduit la résistance à la fatigue de la poutre à laquelle elle est soudée.

D'autres résultats d'essais [5], qui ne sont pas représentés à la FIGURE 2, ont situé la résistance à la fatigue de poutres munies de raidisseurs transversaux entre la ligne de l'attache de 50 mm et la limite supérieure. Etant donné que divers détails constructifs couramment utilisés en Suisse peuvent être assimilés à des attaches plus ou moins longues, les droites de la FIGURE 2 ont été admises comme point de départ de notre étude.

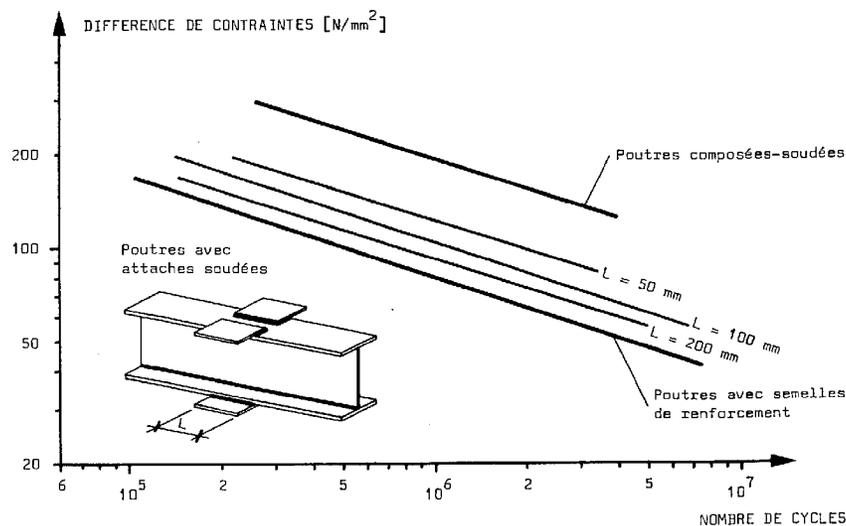


FIGURE 2

Lignes moyennes des résultats de poutres avec attaches de différentes longueurs soudées aux ailes.

2 POUTRES D'ESSAIS

2.1 CHOIX DES DETAILS CONSTRUCTIFS

Quatre types de détails constructifs ont été choisis pour notre étude (FIGURE 3) :

- raidisseur avec plaquette,
- raidisseur transversal soudé à l'aile tendue,
- gousset rectangulaire,
- gousset arrondi.

Les poutres composées-soudées en âme pleine comportent généralement des raidisseurs transversaux. Ces raidisseurs sont soudés à l'âme et à l'aile comprimée mais pas directement à l'aile tendue. La pratique en Suisse est de lier le raidisseur à l'aile tendue par l'intermédiaire d'une plaquette (FIGURE 3 a) ; celle-ci est soudée d'une part au raidisseur et d'autre part à l'aile tendue au moyen d'un cordon longitudinal. Ce type d'assemblage est destiné à éviter toute soudure transversale sur l'aile tendue (FIGURE 3 b).

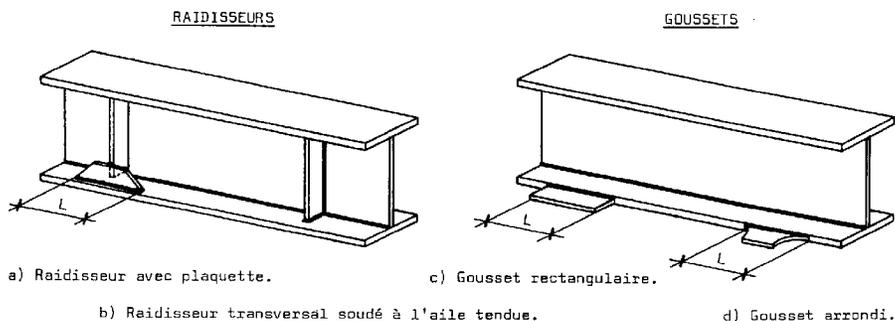


FIGURE 3

Schéma des détails constructifs examinés.

Le deuxième groupe d'assemblages englobe les goussets soudés au bord de l'aile (FIGURE 3 c et d). Les assemblages réalisés au moyen de goussets arrondis permettant de réduire la concentration de contraintes aux extrémités des cordons de soudures, ce qui augmente la durée de vie de la poutre par rapport au gousset rectangulaire.

Il est évident que les quatre types de détails constructifs choisis ne représentent qu'une petite partie de la sélection possible. De plus, une limitation du nombre de poutres d'essais était nécessaire en raison du coût des éprouvettes et de la durée des essais. Ces quatre détails constructifs ont donc été retenus pour une première série d'essais en 1974, qui sera complétée en 1975 par une série portant essentiellement sur les joints de montage bout à bout.

Il convient de remarquer que ces quatre détails englobent encore un grand nombre d'autres paramètres ; par exemple, la forme exacte, la longueur des plaquettes et goussets ainsi que la valeur de la différence de contraintes $\Delta\sigma$.

2.2 PLAN D'EXPERIENCES ET FACTEURS CONTROLES

Rappelons les paramètres les plus importants quant à leurs influences sur le comportement à la fatigue :

- type de détail constructif,
- longueur d'attache,
- différence de contraintes.

Le choix des types de détails constructifs étant fait, il reste à définir leurs dimensions, c'est-à-dire la longueur des plaquettes et des goussets. Afin de pouvoir procéder à une comparaison entre les résultats de ces attaches dites suisses et les résultats existants, les longueurs de 50, 100 et 200 mm ont finalement été retenues, par analogie avec la référence [5].

On a montré à plusieurs reprises [3], [4], [5] que la différence de contraintes $\Delta\sigma$ était le paramètre le plus important pour la durée de vie d'une structure comportant un détail constructif soudé. C'est pourquoi le choix des $\Delta\sigma$ s'est porté sur des valeurs permettant d'obtenir des durées de vie entre 100000 et 10 millions de cycles. La contrainte minimale a été fixée à 20 N/mm^2 ($0,2 \text{ t/cm}^2$).

Le TABLEAU 1, appelé plan d'expériences, résume le choix des paramètres cités ci-dessus. Une colonne du tableau reflète l'effet des types de détails constructifs, et pour un type donné, l'effet de sa longueur sur la durée de vie pour une valeur de $\Delta\sigma$ donnée. Une ligne du tableau permet de constater l'effet de la différence de contraintes $\Delta\sigma$ pour un détail constructif donné. Ce plan d'expériences permet aussi d'établir la pente de la ligne moyenne dans la représentation graphique de la différence de contraintes en fonction du nombre de cycles (diagramme $\Delta\sigma - N$).

Pour connaître la dispersion des résultats d'essais, plusieurs détails doivent être soumis aux mêmes conditions d'essais. Par conséquent, il a été prévu, comme on le voit dans le TABLEAU 1, que trois assemblages identiques soient essayés dans les mêmes conditions de contraintes. Mais dans le but de réduire le nombre total d'essais, la différence de contraintes $\Delta\sigma = 120 \text{ N/mm}^2$ ($1,2 \text{ t/cm}^2$) a été choisie comme base principale de comparaison pour la dispersion.

Pour le contrôle de la pente de la ligne $\Delta\sigma - N$, nous avons prévu deux détails seulement, ayant admis que cette pente est toujours proche de $1/3$ comme cela a été démontré précédemment [3], [4], [5].

Remarquons encore, que certaines différences de contraintes $\Delta\sigma$ ne peuvent pas être retenues dans le plan d'expériences en fonction du détail constructif. Par exemple, des $\Delta\sigma$ faibles nécessitent une durée de vie très longue ($> 10^7$ cycles) ou des $\Delta\sigma$ élevés provoquant une fissure après très peu de cycles ($< 10^5$ cycles) sont à exclure.

Enfin, en ce qui concerne le matériau de base, le choix s'est porté pour les poutres sur la nuance Fe 510. Mais l'on sait que la nuance d'acier n'influence pas de façon déterminante la résistance à la fatigue [3]. Or les contraintes admissibles statiques pour les aciers à haute résistance sont en général plus élevées que pour les aciers normaux, ce qui entraîne des sollicitations dues au trafic plus importantes. La différence de contraintes $\Delta\sigma$ pour les aciers à haute résistance

DETAILS CONSTRUCTIFS		DIFFERENCE DE CONTRAINTES $\Delta\sigma$ [N/mm^2]			
		$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ avec $\sigma_{min} = 20 N/mm^2$			
Type	Dimension	80	120	160	200
RAIDISSEUR TRANSVERSAL SOUDE A L'AILE TENDUE	épaisseur 6 mm		PSR 1 PSR 2 PSR 3		
RAIDISSEUR AVEC PLAQUETTE	L = 50 mm		PSR 1 PSR 4 PSR 5		
	L = 100 mm	PSRG 1 PSRG 2	PSRG 3 PSRG 4	PSRG 5 PSRG 6	
	L = 200 mm		PSR 3 PSR 4 PSR 5		
GOUSSET RECTANGULAIRE	L = 50 mm				
	L = 100 mm	PSRG 1 PSRG 2	PSRG 3 PSRG 4	PSRG 5 PSRG 6	
	L = 200 mm		PSG 1 PSG 2 PSG 3		
GOUSSET ARRONDI (R = 70 mm)	L = 200 mm		PSG 1 PSG 2 PSG 3		

Désignation des éprouvettes : P = Poutre, S = Soudée, R = Raidisseur, G = Gousset.

TABLEAU 1

Plan d'expériences et choix des facteurs contrôlés.

sera donc plus élevée, d'où une durée de vie plus courte.

Le plan d'expériences du TABLEAU 1 contient 28 assemblages, en tenant compte des pièces identiques. Ces assemblages sont répartis sur quatorze poutres d'essais, soit deux assemblages par poutre. Une grande importance est donnée à l'assemblage du type "raidisseur avec plaquette", ainsi qu'aux goussets rectangulaires. Le type "gousset arrondi" a été prévu comme test pilote, tandis que les raidisseurs soudés se réfèrent à un grand nombre d'essais existants [5]. Ces deux derniers types d'assemblages ont donc été fabriqués en trois exemplaires seulement.

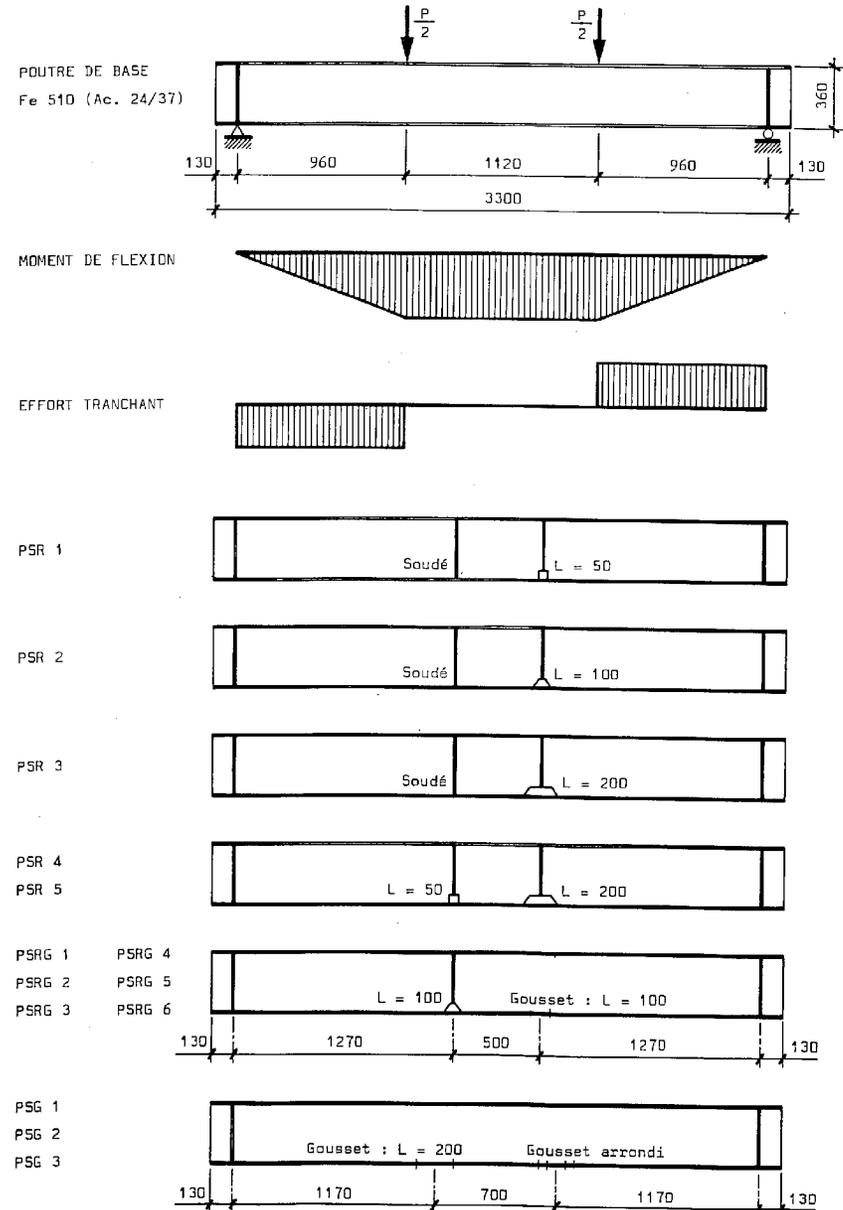


FIGURE 4

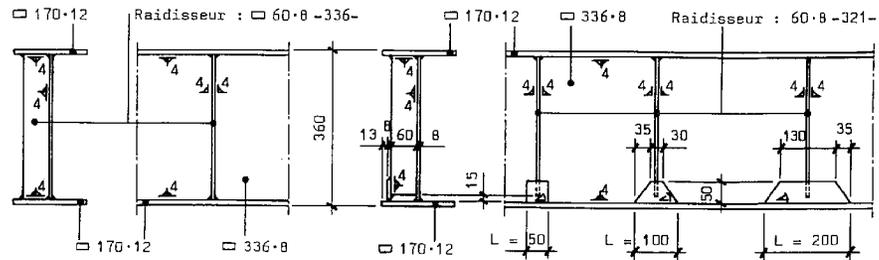
Schémas et désignations des poutres d'essais.

2.3 TYPES DE POUTRES

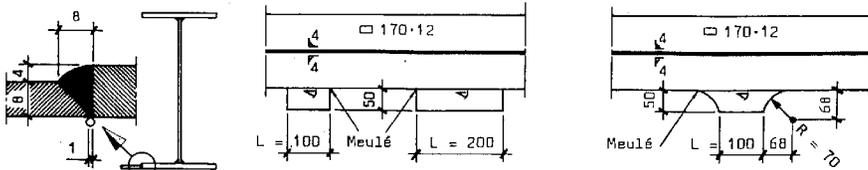
La FIGURE 4 montre l'ensemble des quatorze poutres d'essais ; les trois premières concernent par exemple la comparaison directe entre raidisseurs avec plaquette et raidisseurs soudés à l'aile tendue. La cinquième poutre est munie d'un raidisseur avec plaquette et d'un gousset d'une longueur de 100 mm ; elle a été fabriquée en six exemplaires.

Les poutres de base, composées-soudées, de 360 mm de hauteur, ont une portée de 3040 mm. Leur section transversale correspond à celle de la poutrelle laminée IPE 360 afin de se réserver la possibilité d'essayer des profilés de mêmes dimensions. Les poutres sont soumises à deux charges concentrées variant sinusoidalement entre une valeur minimale et une valeur maximale.

Les détails constructifs se trouvent toujours dans la zone de flexion pure et hors de la zone d'influence des charges concentrées. Normalement, une fissure se produit à une ou aux deux extrémités d'un détail constructif, par exemple aux extrémités du cordon longitudinal de la plaquette (première poutre de la FIGURE 4). Une réparation à l'endroit de la fissure au moyen de couvre-joints permet alors de continuer l'essai de fatigue et d'obtenir une fissure au second détail constructif de la poutre.



a) Raidisseur transversal soudé aux ailes. b) Raidisseurs avec plaquette (épaisseur : 8 mm).



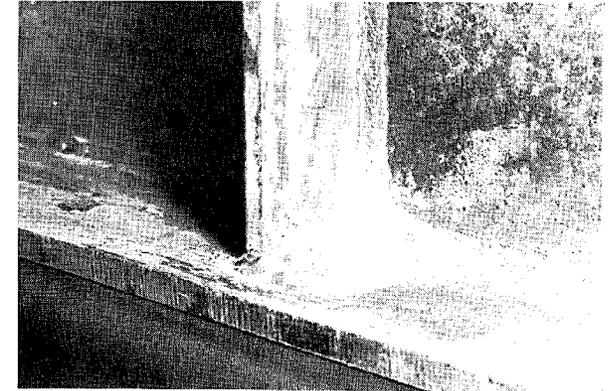
c) Goussets rectangulaires (épaisseur 8 mm).

d) Gousset arrondi.

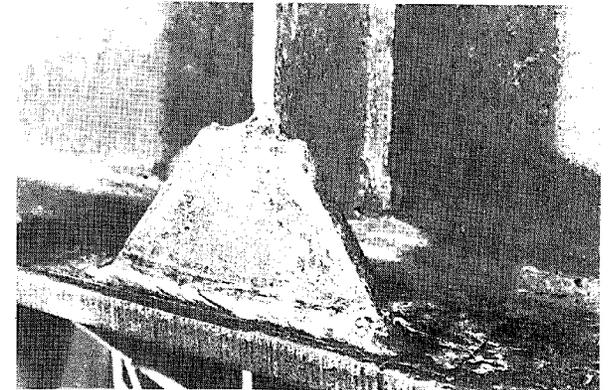
FIGURE 5

Dimensions des détails constructifs.

a) Raidisseur transversal soudé à l'aile tendue.



b) Raidisseur avec plaquette (L = 100 mm).



c) Gousset rectangulaire (L = 100 mm).

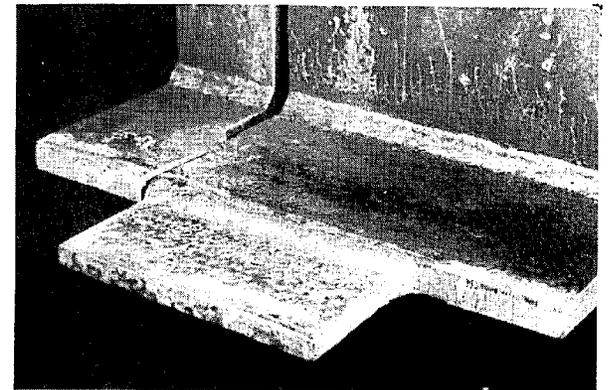


FIGURE 6

Vue de trois détails constructifs.

2.4 DETAILS DE FABRICATION

La fabrication des poutres de base ainsi que la mise en place des détails constructifs (FIGURE 5) ont été faites par une grande entreprise de construction métallique de Suisse romande. Il lui avait été imposé de fabriquer les poutres selon les exigences et les procédés utilisés en construction de ponts. Le processus a été le suivant :

Découpage : Les ailes et l'âme ont été découpées au chalumeau oxyacétylénique (oxycoupage) dans des tôles en acier Fe 510 (Ac. 36/52) de 12 mm et 8 mm d'épaisseur respectivement. Les défauts dus à l'oxycoupage, tels que stries ou entailles sévères aux bords des ailes, ont été réparés par soudage et meulage.

Les détails constructifs tels que raidisseurs, plaquettes et goussets ont été découpés par cisailage dans des tôles de 8 mm en acier Fe 360 (Ac. 24/37). Les chanfreins nécessaires ont été préparés par meulage ou grignotage. On remarque également sur la FIGURE 5 que la hauteur des plaquettes et la largeur des goussets, indépendamment de leur longueur, est constante (50 mm). Ceci pour éviter que les plaquettes longues, et par conséquent plus hautes, ne représentent une augmentation plus forte de l'inertie de la section que les plaquettes courtes.

Préassemblage : Après mise en position par serrage, les tôles ont été préassemblées par pointage. Pour la soudure âme - aile, des points de 40 mm de longueur environ ont été répartis le long de la poutre, de part et d'autre de l'âme, à des distances de 400 à 500 mm environ. Avant de procéder au soudage, les points de soudure avaient été meulés.

Soudage : Les cordons âme - aile ont été déposés l'un après l'autre de façon quasi continue selon le procédé semi-automatique, les poutres étant inclinées à 45° environ. Il s'agissait du soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil fourré. Le gaz était le CO₂, le fil de 2,4 mm de diamètre se déroulant à une vitesse de 3,5 m/min environ, soit un dépôt approximatif de 7 à 8 kg à l'heure. L'ampérage était de 400 A.

Pour la soudure raidisseur - poutre, les ailes ont été redressées si nécessaire avant le pointage des raidisseurs. Les raidisseurs ont été soudés selon le même procédé, mais avec un fil massif, la poutre étant alors en position horizontale. Les plaquettes et goussets ont été soudés dans la position la plus favorable. Les détails de ces assemblages sont également donnés dans la FIGURE 5.

Finitions : Il avait été prévu que les raidisseurs comportent une coupe à 45° de 10 mm dans l'angle formé par l'âme et l'aile de la poutre. A l'exécution, ce détail n'a pas été respecté et de ce fait les cordons raidisseur - aile et raidisseur - âme croisent le cordon de soudure longitudinal de la poutre (FIGURE 6 a). Les soudures longitudinales liant les plaquettes à l'aile ont été soigneusement retournées aux extrémités de la plaquette (FIGURE 6 b). Aucun traitement mécanique (meulage, martelage) n'a suivi le soudage. Par contre, les extrémités des soudures longitudinales en V liant les goussets rectangulaires (FIGURE 6 c) ou les goussets arrondis ont été meulées à la pierre abrasive après que les goussets aient été redressés au chalumeau si nécessaire.

Contrôles : Chaque cordon a été contrôlé par le soudeur soit visuellement, soit au moyen de la méthode du liquide pénétrant, afin de détecter les zones à meuler et à reprendre. Trois goussets ont été contrôlés par radiographie afin de définir la quantité de pores ou défauts se trouvant dans le cordon de soudure.

3 DESCRIPTION DES ESSAIS

3.1 MACHINE D'ESSAIS ET BÂTI DE CHARGE

La poutre d'essai est placée dans le bâti de charge selon le dispositif montré à la FIGURE 7. La poutre est chargée en deux points écartés de 1120 mm et centrés au milieu de la travée de 3040 mm. La charge produite par un vérin à simple effet est appliquée par l'intermédiaire d'une poutre de répartition.

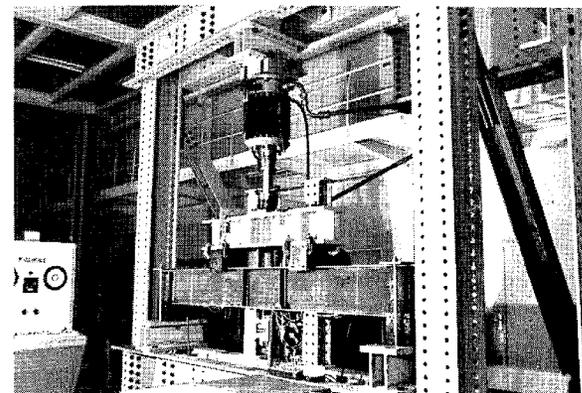


FIGURE 7

Machine d'essais et bâti de charge avec poutre d'essai en place.

Le vérin, d'une capacité dynamique de 500 kN (50 t), est relié à un pulsateur Amsler P 960 dont la capacité pulsatoire oléohydraulique est de 400 cm³. La poutre est alors soumise à des sollicitations de caractère sinusoïdal variant entre une charge minimale et une charge maximale fixes. La fréquence de chargement est de 4 Hz, le pulsateur offrant également la possibilité de travailler à 8 Hz.

3.2 DEROULEMENT DES ESSAIS

La poutre, placée sur ses appuis, est alignée et centrée sous la charge de façon que l'âme soit verticale. Un dispositif garantit la stabilité au déversement de la poutre d'essai et de la poutre de répartition. Afin de prévenir le mouvement hors plan des appuis et des sections d'extrémités de la poutre, celle-ci est munie d'une plaque sur l'aile supérieure reliée à l'appui par des tiges tendues, comme le montre la FIGURE 7.

On procède alors à l'étalonnage de la charge nécessaire par mise en charge statique de la poutre.

La déformation spécifique, déterminée par calcul préliminaire, est mesurée grâce aux jauges de contraintes collées sur la poutre dans la section centrale. La charge calculée est adaptée jusqu'à ce que la valeur théorique des déformations spécifiques soit obtenue. Ces mesures sont répétées plusieurs fois, et en particulier après une courte période de pulsation.

La déformation spécifique à l'endroit des jauges est calculée de façon que la charge ainsi étalonnée produise à l'endroit des détails constructifs des contraintes nominales conformes au plan d'expériences. Les jauges de contraintes sont de plus reliées à un oscilloscope permettant de contrôler les déformations spécifiques sous charges dynamiques. Après corrections éventuelles des charges dues aux effets d'inertie, la machine est mise en marche avec un comptage automatique des cycles. D'autres détails sur ce procédé d'étalonnage et sur la mise en marche sont donnés dans la référence [6].

Deux dispositifs de surveillance permettant de détecter les fissures de fatigue sont montés sur la poutre :

- une surveillance par fil [7] situé à l'endroit probable de la future fissure et collé transversalement à celle-ci,
- un contrôle automatique de la flèche de la poutre par microrupteur.

En cours d'essais, la poutre est également soumise à une inspection visuelle et dans certains cas, à un contrôle par la méthode du liquide pénétrant.

Comme les poutres d'essai comportent deux détails constructifs (voir FIGURES 4 et 7), il est avantageux, après apparition d'une fissure à l'un d'eux, de réparer la poutre. Cette réparation s'effectue avec des couvre-joints d'ailes fixés de part et d'autre de la fissure à l'aide de boulons HP précontraints ou de serre-joints puissants [6]. Cette réparation a pour but d'arrêter la propagation de la fissure et de poursuivre l'essai jusqu'à l'apparition d'une fissure au deuxième détail.

Le déroulement chronologique de l'essai pour chaque poutre, ainsi que le nombre de cycles jusqu'à l'apparition d'une fissure visible à l'oeil nu sont donnés au chapitre suivant.

4 RESULTATS DES ESSAIS

4.1 PRESENTATION DES RESULTATS

Rappelons que chaque poutre est munie de deux détails constructifs. L'ANNEXE 1 donne le nombre de cycles à l'apparition des fissures, à la réparation et à l'arrêt de l'essai, pour chaque poutre et par ordre numérique. Les emplacements des fissures par rapport au raidisseur, plaquettes ou goussets sont également indiqués dans cette annexe.

Il convient de remarquer que l'ordre chronologique des essais est arbitraire et ne coïncide donc pas avec l'ordre des poutres de l'ANNEXE 1. Ce fait est nécessaire pour éviter tout préjugé humain sur le déroulement d'un essai avec une suite de mêmes poutres, et pour répartir l'expérience technique acquise pendant la série d'essais sur tous les types de poutres. En effet, au cours des essais, on s'est aperçu que la détection des fissures à l'oeil nu est premièrement très difficile et deuxièmement ne permet pas toujours d'arrêter la machine au moment où une fissure atteint des dimensions prédéterminées.

De ce fait, la technique du fil détecteur de fissures [7], mise au point et appliquée dès la deuxième moitié des essais environ, a permis une détection des fissures à un stade moins avancé. Par conséquent, la poutre n'est pas réparée tout de suite après la première détection de la fissure, mais dès que la fissure atteint des proportions semblables à celles d'une fissure visible à l'oeil nu.

Par exemple, le résultat de l'essai de la poutre PSR 2 (voir ANNEXE 1) donne 572000 cycles pour la première détection des fissures aux deux extrémités de la plaquette. C'est seulement après environ 100000 cycles supplémentaires, à savoir à 673000 cycles, que la poutre est réparée dans la région de la plaquette. Après un total de 2795000 cycles, une troisième fissure est détectée au second détail, à savoir, à la racine du raidisseur transversal.

L'ANNEXE 2 résume les dimensions des fissures au moment de la première observation et au moment de l'arrêt de l'essai ou de la réparation de la poutre. Ce résumé classe les résultats selon les détails constructifs pour faciliter une comparaison des nombres de cycles, ainsi que des formes et dimensions des fissures. La relation entre les ANNEXES 1 et 2 est assurée par la désignation des poutres et le numéro des fissures.

4.2 DESCRIPTION DES FISSURES

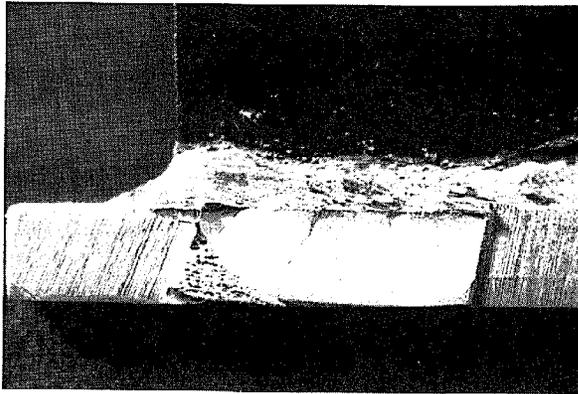
Les photographies de la FIGURE 8 montrant l'emplacement des fissures de fatigue par rapport aux détails constructifs. On a choisi de représenter de petites fissures afin de bien montrer l'endroit de l'origine de la fissure et son mode de propagation.

En règle générale, les fissures se forment à l'extrémité d'un assemblage, plus précisément à la racine de la soudure liant l'élément à l'aile tendue de la poutre. Ces racines d'extrémités constituent une entaille et contiennent normalement des microfissures dues au soudage. De plus, les microfissures se trouvent dans une zone où les contraintes sont concentrées du fait des variations dans la géométrie. Considérons les exemples suivants :

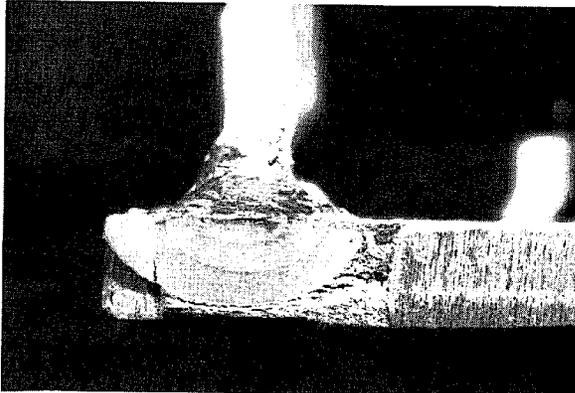
Raidisseur avec plaquette : La FIGURE 8 b montre une fissure de fatigue qui a pris naissance à la racine de la soudure liant la plaquette à l'aile tendue. L'endroit exact est la racine de la soudure longitudinale, là où le cordon est retourné à l'extrémité de la plaquette. On remarque que la fissure est de forme semi-elliptique avec axe principal horizontal. Cette fissure, d'apparence lisse, est entièrement comprise dans le matériau de base de la poutre. Pour mettre en évidence la fissure elle-même, nous avons découpé à la scie une grande partie de la section, le solde étant arraché par traction. A l'endroit de la fissure, les contraintes sont concentrées à cause de la participation de la plaquette à la résistance statique de la section. De même, des contraintes résiduelles provenant du soudage et atteignant souvent la limite élastique, tendent à ouvrir les microfissures situées à la racine de la soudure. Par conséquent, l'endroit de la fissure est prédéterminé. Nous avons décelé normalement dans nos essais une fissure à chaque extrémité de la plaquette (voir ANNEXE 1), mais par contre aucune fissure n'a été observée dans le cordon lui-même.

Raidisseur soudé : Dans ce cas, la fissure prend naissance à la racine de la soudure transversale du raidisseur. La FIGURE 8 a montre une fissure dans son état final (fin de l'essai), mais partiellement détruite par la coupe à la scie. Néanmoins, la partie foncée de la fissure indique son allure et ses dimensions à un stade moins avancé de la propagation. On y distingue plusieurs petites demi-ellipses, dont l'axe principal est sur la racine de la soudure transversale, qui se

a) Raidisseur transversal soudé à l'aile tendue.



b) Raidisseur avec plaquette (L = 100 mm).



c) Gousset arrondi (R = 70 mm).

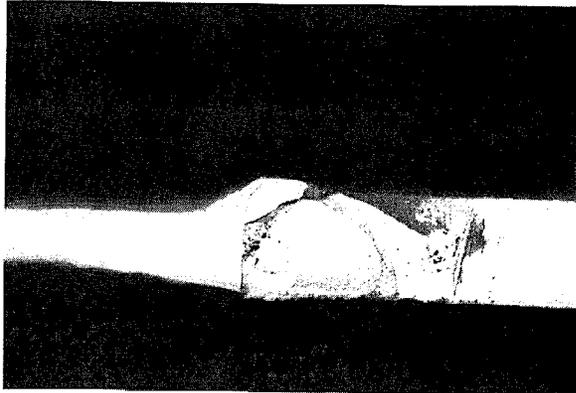


FIGURE B

Vue des surfaces de fissures de trois détails constructifs.

recouvrent partiellement. Ceci indique que plusieurs fissures et non pas une seule se sont formées en différents endroits le long de la racine. A un certain moment, ces fissures se sont réunies pour ne former que la fissure foncée. Ce groupe de fissures s'est propagé ensuite à la manière d'une seule jusqu'à ce que celle-ci ait traversé l'aile. A ce moment-là, le front continu de la fissure s'est séparé en deux comme le montre la fissure finale de la FIGURE 8 a.

Gousset : Comme pour les plaquettes, la fissure se forme aux extrémités du cordon longitudinal liant le gousset à l'aile tendue. Dans le cas d'un gousset rectangulaire, l'emplacement est très clairement situé à l'extrémité du cordon, comme le montre la FIGURE 6 c. Par contre, l'emplacement de la fissure est mal défini dans le cas d'un gousset arrondi, car l'extrémité de la soudure est meulée pour donner au gousset sa forme prévue. Cette opération de meulage enlève l'entaille géométrique à la racine de la soudure. Si, en même temps, les microfissures et les défauts dans le cordon même sont enlevés, il en résulte une situation très favorable au point de vue du comportement à la fatigue. En effet, la poutre PSG 2 (voir ANNEXE 1) ne comportait aucune fissure au gousset arrondi, tandis que les deux autres goussets arrondis (voir ANNEXE 2 et FIGURE 8 c) donnaient naissance à une fissure à l'extrémité du cordon.

En conclusion, les fissures de fatigue se forment toujours à la racine de la soudure aux extrémités des assemblages (FIGURE 8), à savoir :

- le long de la soudure transversale du raidisseur soudé à l'aile,
- à l'extrémité des plaquettes,
- à l'extrémité des goussets.

On décèle en général une fissure de fatigue à chaque extrémité de la plaquette, tandis que les goussets ne présentent normalement une fissure (voir ANNEXE 1) qu'à une seule extrémité. Ceci provient probablement du fait que les extrémités du cordon de soudure sont légèrement meulées, dans le cas des goussets, introduisant ainsi deux conditions légèrement différentes. Par contre, les soudures des plaquettes ne sont pas traitées, laissant ainsi intactes les conditions d'entailles et de microfissures.

4.3 RESULTATS DES POUTRES AVEC PLAQUETTES

La FIGURE 9 représente les résultats d'essais des poutres avec raidisseurs munis de plaquettes. Le nombre de cycles N à l'observation finale selon ANNEXE 2 est reporté en abscisse en fonction de la différence de contraintes $\Delta\sigma$, les deux échelles étant logarithmiques. Ces résultats représentent trois longueurs de plaquette, à savoir 50, 100 et 200 mm.

La ligne moyenne des plaquettes d'une longueur de 100 mm est donnée par l'équation :

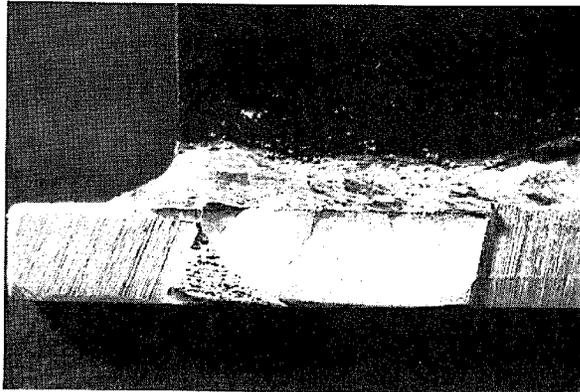
$$\log N = 12,315 - 3,129 \log \Delta\sigma . \tag{1}$$

La déviation standard $s = 0,051$ est également le logarithme d'un nombre de cycles. Cette droite de régression, de forme générale

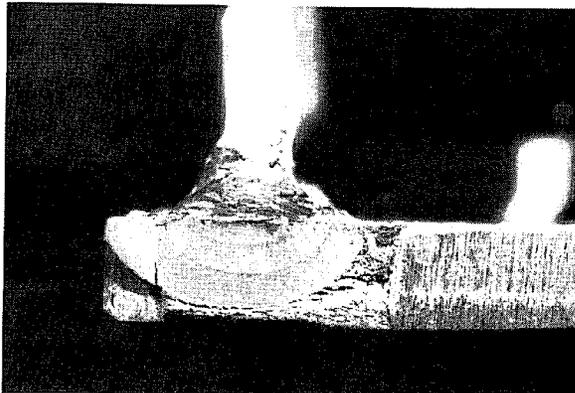
$$N = A \Delta\sigma^{-B} , \tag{2}$$

représente généralement le mieux possible les résultats d'essais [3], [4], [5], le facteur B étant la pente de la droite.

a) Raidisseur transversal soudé à l'aile tendue.



b) Raidisseur avec plaquette (L = 100 mm).



c) Gousset arrondi (R = 70 mm).

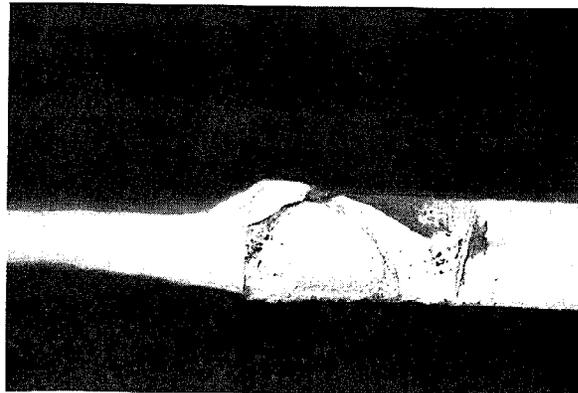


FIGURE 8

Vue des surfaces de fissures de trois détails constructifs.

recouvrent partiellement. Ceci indique que plusieurs fissures et non pas une seule se sont formées en différents endroits le long de la racine. A un certain moment, ces fissures se sont réunies pour ne former que la fissure foncée. Ce groupe de fissures s'est propagé ensuite à la manière d'une seule jusqu'à ce que celle-ci ait traversé l'aile. A ce moment-là, le front continu de la fissure s'est séparé en deux comme le montre la fissure finale de la FIGURE 8 a.

Gousset : Comme pour les plaquettes, la fissure se forme aux extrémités du cordon longitudinal liant le gousset à l'aile tendue. Dans le cas d'un gousset rectangulaire, l'emplacement est très clairement situé à l'extrémité du cordon, comme le montre la FIGURE 6 c. Par contre, l'emplacement de la fissure est mal défini dans le cas d'un gousset arrondi, car l'extrémité de la soudure est meulée pour donner au gousset sa forme prévue. Cette opération de meulage enlève l'entaille géométrique à la racine de la soudure. Si, en même temps, les microfissures et les défauts dans le cordon même sont enlevés, il en résulte une situation très favorable au point de vue du comportement à la fatigue. En effet, la poutre PSG 2 (voir ANNEXE 1) ne comportait aucune fissure au gousset arrondi, tandis que les deux autres goussets arrondis (voir ANNEXE 2 et FIGURE 8 c) donnaient naissance à une fissure à l'extrémité du cordon.

En conclusion, les fissures de fatigue se forment toujours à la racine de la soudure aux extrémités des assemblages (FIGURE 8), à savoir :

- le long de la soudure transversale du raidisseur soudé à l'aile,
- à l'extrémité des plaquettes,
- à l'extrémité des goussets.

On décèle en général une fissure de fatigue à chaque extrémité de la plaquette, tandis que les goussets ne présentent normalement une fissure (voir ANNEXE 1) qu'à une seule extrémité. Ceci provient probablement du fait que les extrémités du cordon de soudure sont légèrement meulées, dans le cas des goussets, introduisant ainsi deux conditions légèrement différentes. Par contre, les soudures des plaquettes ne sont pas traitées, laissant ainsi intactes les conditions d'entailles et de microfissures.

4.3 RESULTATS DES POUTRES AVEC PLAQUETTES

La FIGURE 9 représente les résultats d'essais des poutres avec raidisseurs munis de plaquettes. Le nombre de cycles N à l'observation finale selon ANNEXE 2 est reporté en abscisse en fonction de la différence de contraintes $\Delta\sigma$, les deux échelles étant logarithmiques. Ces résultats représentent trois longueurs de plaquette, à savoir 50, 100 et 200 mm.

La ligne moyenne des plaquettes d'une longueur de 100 mm est donnée par l'équation :

$$\log N = 12,315 - 3,129 \log \Delta\sigma . \tag{1}$$

La déviation standard $s = 0,051$ est également le logarithme d'un nombre de cycles. Cette droite de régression, de forme générale

$$N = A \Delta\sigma^{-B} , \tag{2}$$

représente généralement le mieux possible les résultats d'essais [3], [4], [5], le facteur B étant la pente de la droite.

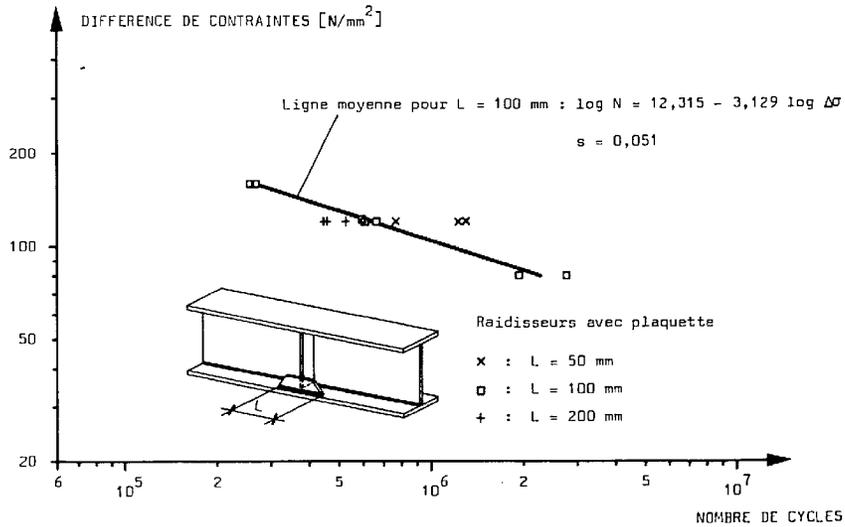


FIGURE 9

Résultats d'essais de poutres avec raidisseurs munis de plaquettes.

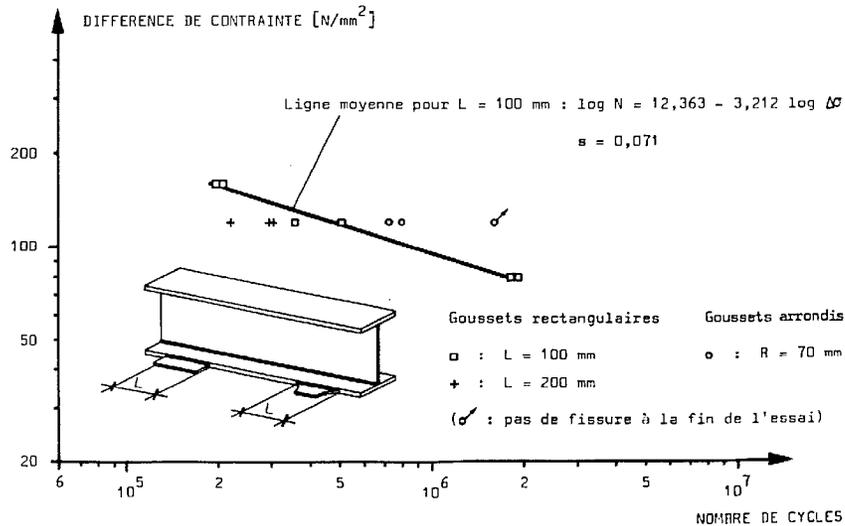


FIGURE 10

Résultats d'essais de poutres avec goussets soudés à l'aile tendue.

On remarque que la longueur des plaquettes est un paramètre principal ; ceci est mis en évidence au niveau $\Delta\sigma = 120 \text{ N/mm}^2$ ($1,2 \text{ t/cm}^2$). Rappelons que chaque point de la FIGURE 9 représente généralement deux fissures, une à chaque extrémité de la plaquette.

4.4 RESULTATS DES POUTRES AVEC GOUSSETS

Les résultats d'essais de poutres avec goussets soudés à l'aile tendue sont représentés à la FIGURE 10. La ligne moyenne des goussets de 100 mm, correspondant à l'équation

$$\log N = 2,363 - 3,212 \log \Delta\sigma \quad (3)$$

met en évidence une réduction de la durée de vie des goussets de 200 mm.

Par contre, le rayon de 70 mm des goussets arrondis augmente clairement la résistance à la fatigue. Les raisons en sont les suivantes :

- le rayon de l'arrondi réduit la concentration de contraintes aux extrémités du gousset,
- le meulage enlève l'entaille à l'extrémité du cordon liant le gousset à l'aile,
- les microfissures de la racine à l'extrémité de la soudure sont parfois enlevées par l'opération de meulage.

4.5 COMPARAISON ENTRE PLAQUETTES ET GOUSSETS

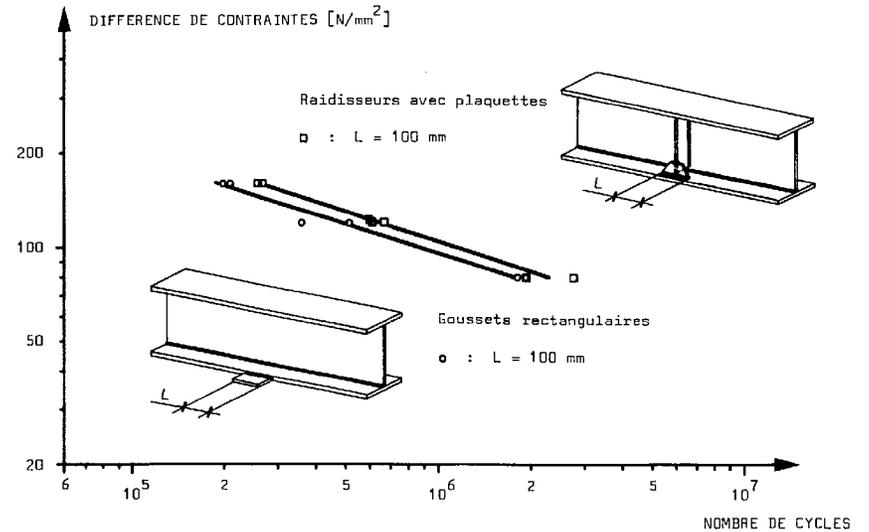


FIGURE 11

Comparaison des résultats de poutres avec raidisseurs munis de plaquettes ($L = 100 \text{ mm}$) et poutres avec goussets rectangulaires ($L = 100 \text{ mm}$).

La comparaison des résultats de poutres avec raidisseurs munis de plaquettes et ceux de poutres avec goussets rectangulaires se limite aux attaches d'une longueur de 100 mm. La FIGURE 11 représente les résultats d'essais ainsi que les lignes moyennes des deux types d'attaches.

On remarque une réduction nette de la durée de vie des goussets rectangulaires. Ce phénomène, qui demande une étude plus poussée, s'explique toutefois partiellement par les observations suivantes :

- 1.- Les fissures des goussets partent du bord de l'aile, tandis que les fissures des plaquettes se situent à une certaine distance du bord de l'aile comme le montrent la FIGURE 8 et les schémas de l'ANNEXE 2.
- 2.- La propagation des fissures partant du bord de l'aile est plus rapide que celle des autres fissures.
- 3.- Les goussets sont soudés dans le plan de l'aile tandis que les plaquettes le sont parallèlement à l'âme. Ceci pourrait légèrement augmenter la concentration des contraintes aux extrémités des goussets du fait d'une plus grande participation statique de ces derniers.

Le point 2.- peut être illustré par la méthode de la mécanique de la rupture [8]. En partant du facteur d'intensité de contrainte K, les différentes fissures peuvent être comparées comme le montre la FIGURE 12 :

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} f(a) ; \tag{4}$$

σ : contrainte nominale appliquée à une certaine distance de la fissure,

a : dimension caractéristique de la fissure,

$f(a)$: facteur de correction tenant compte de la géométrie de la fissure.

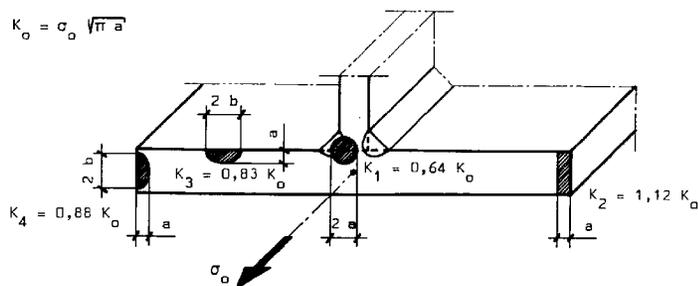


FIGURE 12

Schéma de fissures dans une section composée-soudée et facteurs d'intensité de contrainte K.

- 1.- Fissure dans le cordon longitudinal aile - âme ; elle peut être assimilée selon la référence [9] à une fissure circulaire de diamètre $2a$ à l'intérieur d'un milieu élastique infini, avec :

$$K_1 = \sigma_0 \sqrt{\pi a} \frac{2}{\pi} = 0,64 K_0 ; \tag{5}$$

$$K_0 = \sigma_0 \sqrt{\pi a} .$$

2.- Fissure au bord de l'aile :

$$K_2 = \sigma_0 \sqrt{\pi a} \cdot 1,12 = 1,12 K_0 . \tag{6}$$

3.- Fissure semi-elliptique dans l'aile, avec un rapport $b/a = 2$ des axes principaux de l'ellipse :

$$K_3 = \sigma_0 \sqrt{\pi a} \cdot 0,83 = 0,83 K_0 . \tag{7}$$

4.- Même fissure semi-elliptique, au bord de l'aile, en tenant compte de la surface libre au bord de l'aile :

$$K_4 = \sigma_0 \sqrt{\pi a} \cdot 0,83 \cdot 1,06 = 0,88 K_0 . \tag{8}$$

On remarque que la fissure semi-elliptique au bord de l'aile donne un facteur d'intensité de contrainte K légèrement supérieur à celui d'une même fissure dans l'aile. Les fissures aux extrémités des goussets représentent donc une condition légèrement plus sévère que les fissures aux extrémités d'une plaquette ($K_4 = 0,88 K_0$ par rapport à $K_3 = 0,83 K_0$), ceci pour des conditions de géométrie et de contraintes égales.

La différence entre les deux détails constructifs devient plus prononcée quand la fissure du bord de l'aile a pris la forme rectangulaire montrée à droite sur le schéma de la FIGURE 12 ($K_2 = 1,12 K_0$ par rapport à $K_3 = 0,83 K_0$).

Pour estimer maintenant l'effet des différentes valeurs K_i sur la durée de vie, on utilise une loi de propagation de fissures selon la référence [10]. La propagation de la fissure, c'est-à-dire l'augmentation de sa dimension a par cycle de charge, s'exprime par

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m ; \tag{9}$$

avec :

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} f(a) ; \tag{10}$$

$\Delta \sigma$: différence de contraintes,

ΔK : différence de facteurs d'intensité de contrainte,

C : constante du matériau,

m : constante du matériau se situant entre 2 et 4 selon la référence [11].

L'équation (9) peut être utilisée pour calculer le nombre de cycles N_{ij} nécessaire à propager une fissure d'une dimension a_i (par exemple : défaut initial) à une dimension a_j (fissure finale), avec :

$$N_{ij} = \int_{a_i}^{a_j} dN = \int_{a_i}^{a_j} \frac{da}{C \Delta K^m} . \tag{11}$$

Une intégration analytique [9] est seulement possible dans le cas d'une expression particulière du facteur de correction de géométrie $f(a)$, ou si ce dernier est constant. Dans ce cas, le nombre de cycles devient, avec $\alpha = m/2 - 1$:

$$N_{ij} = \frac{1}{C} \frac{1}{\alpha [\Delta\sigma \sqrt{m} f(a)]^m} (a_i^{-\alpha} - a_j^{-\alpha}) \quad (12)$$

Pour un détail constructif donné, dont on connaît les dimensions du défaut initial a_i et de la fissure à l'arrêt de l'essai a_j et qui est défini par une valeur constante du facteur de correction $f(a)$, cette expression prend la forme :

$$N_{ij} = C \cdot \Delta\sigma^{-m} \quad (13)$$

Elle correspond à l'expression générale de la droite de régression définie auparavant [équation (2)], à savoir :

$$N = A \Delta\sigma^{-B}$$

Le coefficient B correspond à m et caractérise la pente de la droite de régression. La référence [3] donne des valeurs expérimentales de cette pente m qui se situent toujours entre 2,85 et 3,25. On trouve pour les résultats d'essais de poutres avec plaquettes et goussets [équations (1) et (3)] des valeurs similaires, soit 3,129 et 3,212 respectivement.

Regardons maintenant la différence entre les fissures des plaquettes et celles des goussets. Les équations (7) et (8) et la FIGURE 12 donnent des valeurs du facteur de correction légèrement différentes, soit 0,83 et 0,88 respectivement. En posant $m = 3$ dans l'équation (12) (tous les autres paramètres étant les mêmes pour les deux détails), il en résulte un rapport des durées de vie entre goussets et plaquettes de l'ordre de :

$$\frac{N_g}{N_p} = \left(\frac{0,88}{0,83} \right)^{-3} = 0,84$$

Cette approximation indique que la durée de vie des poutres munies de goussets devrait être de l'ordre de 84 % de celle des poutres avec raidisseur munis de plaquettes. Ce résultat confirme la différence entre les deux lignes de régression montrées à la FIGURE 11.

Pour clore cet exemple, il convient de souligner que la comparaison est possible seulement pour une plaquette et un gousset de même longueur, c'est-à-dire pour une fissure dans les mêmes conditions de concentration de contraintes. La comparaison entre la plaquette et le raidisseur est évidemment plus difficile. On peut d'ores et déjà conclure que le raidisseur, à cause de son épaisseur réduite, constitue une plaquette très courte. Par conséquent, la concentration des contraintes sera réduite et la durée de vie plus grande que pour toutes les autres plaquettes.

5 COMPARAISON AVEC D'AUTRES RESULTATS

Le présent chapitre a pour but de relier nos résultats à d'autres recherches, en particulier à celles décrites dans les références [3] et [5]. De plus, cette comparaison permet de situer ces résultats par rapport aux bornes inférieure et supérieure définies aux FIGURES 1 et 2.

5.1 COMPARAISON AVEC LES POUTRES COMPOSEES - SOUDEES

La poutre composée-soudée constitue par définition la limite supérieure de tous les résultats, car une attache, quelle qu'elle soit, réduit la durée de vie par son effet d'entaille. Les résultats d'essais de poutres composées-soudées fabriquées à partir de trois nuances d'acier [3]

sont représentés à la FIGURE 13. La ligne moyenne des résultats et la ligne indiquant 95 % de probabilité de survie y sont également tracées.

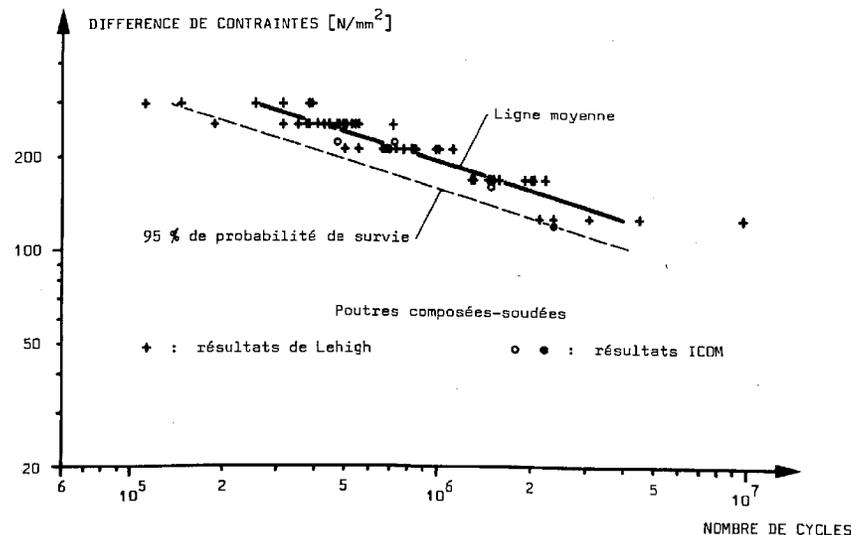


FIGURE 13
Résultats d'essais de poutres composées-soudées.

Les résultats d'essais obtenus à l'ICOM ont aussi été reportés sur cette figure. Il s'agit des tests pilotes [6] et du résultat de la poutre PSR 1 (voir ANNEXES 1 et 2). On remarque une bonne corrélation entre les résultats à l'exception du point situé sur la ligne indiquant 95 % de probabilité de survie. Ce résultat défavorable provient du fait qu'une reprise de soudure mal exécutée a provoqué la fissure. Une telle reprise de soudure serait normalement réparée lors d'une exécution soignée. Si ce n'était pas le cas, il existerait une très grande probabilité que la poutre fut munie d'un détail constructif, le dimensionnement à la fatigue étant alors basé sur cette attache plus défavorable. Donc, la limite supérieure, même si elle pouvait donner l'impression d'être favorable pour certaines exécutions de moindre qualité, n'intervient que rarement dans un dimensionnement à la fatigue.

5.2 COMPARAISON AVEC LES ATTACHES

Les FIGURES 14, 15 et 16 permettent de comparer les résultats d'essais de poutres avec attaches [5], aux résultats de cette étude. Pour chaque longueur d'assemblage, les résultats suivants sont représentés :

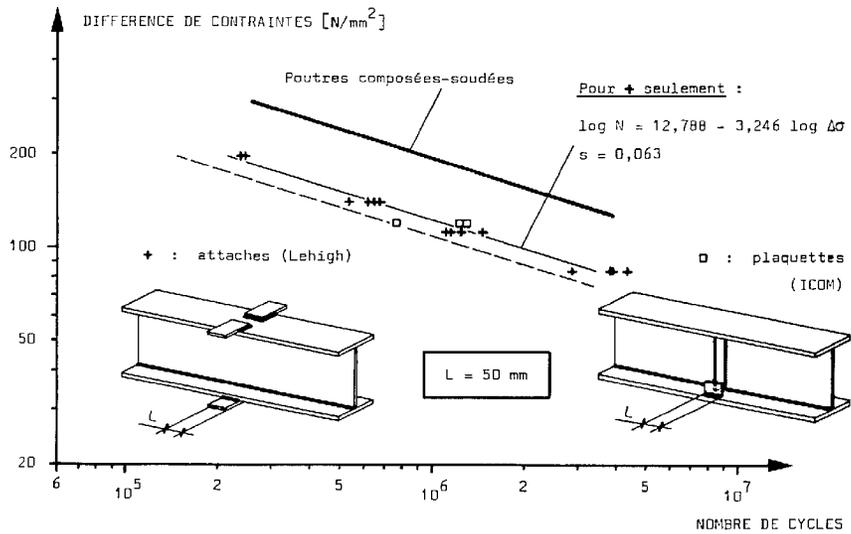


FIGURE 14

Comparaison des résultats de différents détails constructifs (L = 50 mm).

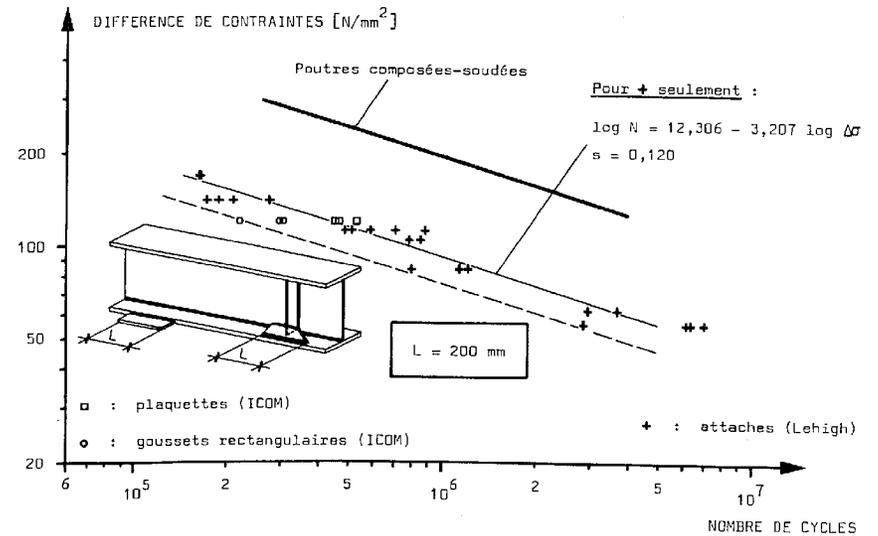


FIGURE 16

Comparaison des résultats de différents détails constructifs (L = 200 mm).

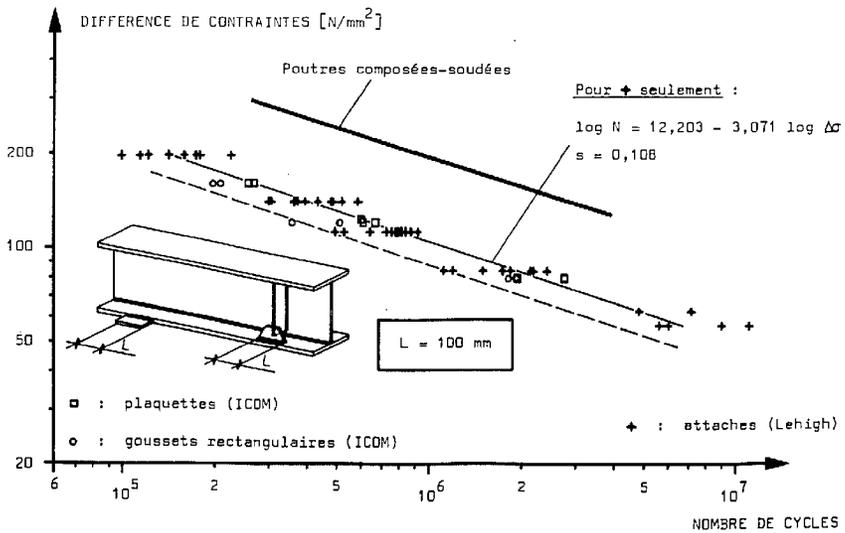


FIGURE 15

Comparaison des résultats de différents détails constructifs (L = 100 mm).

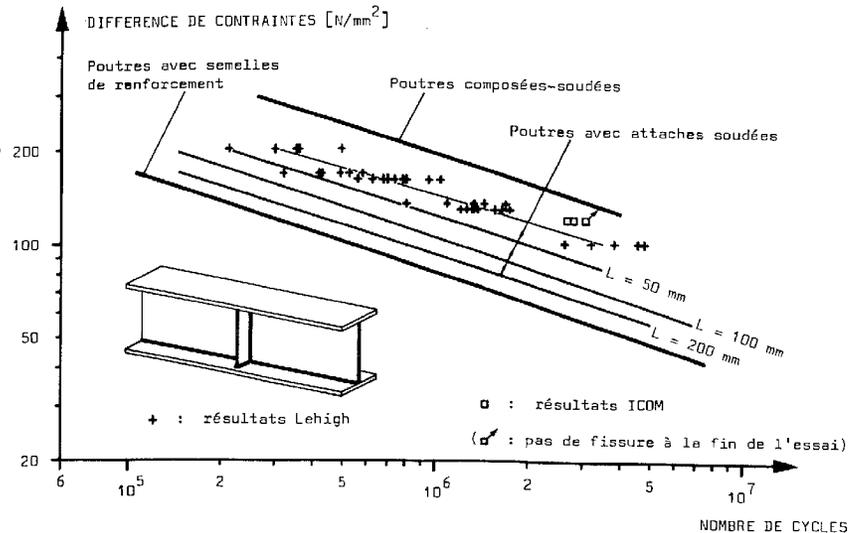


FIGURE 17

Résultats d'essais de poutres avec raidisseurs soudés à l'aile tendue.

- les résultats d'essais de poutres avec attaches ainsi que leur ligne moyenne et la ligne indiquant 95 % de probabilité de survie,
- les résultats d'essais ICOM de poutres avec raidisseurs munis de plaquettes,
- les résultats d'essais ICOM de poutres avec goussets,
- la ligne moyenne des poutres composées-soudées.

On remarque que les résultats des plaquettes se situent très près de la ligne moyenne des résultats d'attaches, ceci pour les trois longueurs. Par contre, comme on l'a vu auparavant, les essais de poutres avec goussets donnent systématiquement une durée de vie plus courte que celle des poutres avec plaquettes, les résultats se situant cependant toujours à droite de la ligne de 95 % de probabilité de survie des attaches, à une exception près.

En conclusion, le comportement à la fatigue des poutres avec plaquettes et goussets peut être représenté, pour chaque longueur, par la droite indiquant une probabilité de survie de 95 % pour les attaches. Pour les goussets, cette simplification est acceptable à condition que les extrémités du cordon de soudure liant le gousset à l'aile soient soigneusement meulées. En pratique, cette condition est rarement remplie, surtout dans le cas des goussets courts où une bonne réalisation du départ et de la fin du cordon est difficile. Il faut par conséquent envisager une diminution de la durée de vie des poutres avec goussets.

5.3 COMPARAISON AVEC LES RAIDISSEURS SOUDES A L'AILE TENDUE

La FIGURE 17 permet une comparaison des trois résultats obtenus au cours de cette étude avec les résultats de la référence [5]. On remarque une durée de vie comparable à celle des résultats précédents les plus favorables. Une explication de ce phénomène n'est pas possible à cause du nombre restreint de résultats.

Le raidisseur soudé transversalement à l'aile tendue représente une sorte d'attache très courte et par conséquent devrait moins réduire la durée de vie que les goussets et plaquettes. Ceci est vérifié lorsque l'on compare la ligne moyenne des raidisseurs aux lignes moyennes des attaches de 50, 100 et 200 mm.

Remarquons encore que tous les résultats de poutres avec raidisseurs sont obtenus avec des raidisseurs moins larges que la demi-largeur de l'aile. Plus précisément, le cordon transversal sur l'aile n'atteint pas le bord de l'aile mais en est maintenu à une certaine distance (voir FIGURE 6 a). Ce détail est important, car un cordon transversal soudé sur toute la largeur de l'aile pourrait provoquer une fissure partant du bord de l'aile, ce qui engendre normalement une propagation plus rapide (voir paragraphe 4.5). On devrait par conséquent toujours laisser un espace de deux à trois centimètres au minimum entre le bord du raidisseur et le bord de l'aile. Cette règle constructive est également valable pour les raidisseurs munis de plaquettes.

6 CONCLUSIONS

Ce rapport traite de l'effet des plaquettes et goussets soudés à l'aile tendue sur la résistance à la fatigue des poutres composées-soudées. Il a été admis au départ de cette recherche, que les conclusions des références [3], [4] et [5] étaient correctes, à savoir :

- 1.- La différence de contraintes $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ est un facteur prédominant pour la durée de vie ; la contrainte maximale ou la contrainte minimale ne sont pas déterminantes dans les assemblages soudés.
- 2.- La nuance d'acier constituant le matériau de base ne modifie pas la résistance à la fatigue des poutres soudées.
- 3.- Tous les résultats se situent entre deux valeurs limites. La poutre composée-soudée constitue la limite supérieure, la poutre avec semelle de renforcement la limite inférieure.
- 4.- Toutes les droites de régression sont approximativement parallèles entre elles avec une pente d'environ 1/3.

Pour notre recherche, le plan d'expériences, le choix des paramètres contrôlés ainsi que le nombre total de poutres d'essais ont été influencés par ces connaissances préliminaires.

Les résultats de nos essais sont donnés à l'ANNEXE 1 par ordre numérique, tandis que l'ANNEXE 2 résume les résultats en fonction des détails constructifs. Les conclusions les plus importantes, basées sur les résultats d'essais et la comparaison avec d'autres résultats, sont les suivantes :

- 1.- La longueur des attaches est un paramètre significatif pour la durée de vie : plus l'attache est longue, plus la durée de vie de la poutre est courte.
- 2.- Les fissures de fatigue se forment toujours aux extrémités des plaquettes et goussets, à la racine des cordons de soudure.
- 3.- Dans le cas des goussets, les fissures se développent à partir du bord de l'aile, ce qui réduit légèrement la durée de vie par rapport à celle des plaquettes.
- 4.- Les résultats des plaquettes et goussets rectangulaires correspondent à ceux des attaches, ceci pour les trois longueurs 50, 100 et 200 mm.
- 5.- L'arrondi reliant le gousset à l'aile a un effet favorable, bien que des essais supplémentaires soient nécessaires pour déterminer quantitativement l'influence de son rayon.
- 6.- Les résultats des raidisseurs soudés transversalement à l'aile tendue confirment favorablement ceux trouvés précédemment.
- 7.- La limite supérieure définie par les résultats des poutres composées-soudées est également confirmée.
- 8.- La pente de la droite de régression est de 1/3,13 pour les plaquettes et de 1/3,21 pour les goussets.

Pour clore, il convient de remarquer que ces résultats d'essais font partie intégrante d'une recherche plus étendue. En particulier, une deuxième série d'essais traitera les paramètres suivants : le rayon des goussets arrondis, l'épaisseur de l'aile tendue. Les goussets soudés sur l'âme et les joints de montage. Néanmoins, le grand nombre de résultats existants permet d'ores et déjà de formuler de nouvelles directives concernant la résistance à la fatigue des constructions métalliques soudées.

REMERCIEMENTS

Ce rapport fait partie intégrante de la recherche traitant le comportement à la fatigue des ponts et en particulier des ponts-rails. Il convient de remercier ici les Chemins de Fer Fédéraux (CFF) et l'Union des entreprises Suisses de Transports publics (UST) de leur appui financier. L'intérêt de M. Portmann, directeur de la Division des Travaux (Direction Générale des CFF), de M. Bosshert, chef de section et de M. von Allmen, ingénieur, nous a permis d'orienter notre recherche de façon à servir les besoins des chemins de fer suisses et de l'Union Internationale des Chemins de Fer (UIC).

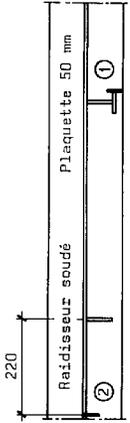
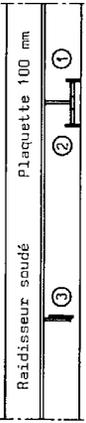
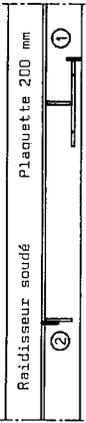
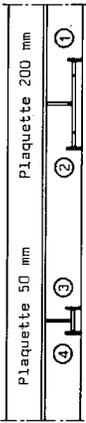
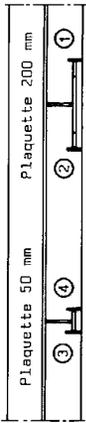
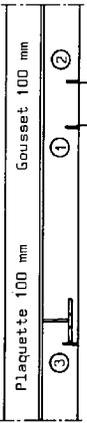
Nous tenons à remercier également M. Matti Raukko, ingénieur finlandais et ancien collaborateur de l'ICOM, qui a pris une part très active à l'exécution des essais en laboratoire et au dépouillement des résultats. Ces essais ont été réalisés à l'Institut des Métaux et Machines (IMM), qui a mis à notre disposition une partie de sa halle d'essais. Les essais ont été préparés par M. Gilbert Pidoux, mécanicien, que nous remercions de son travail soigné et systématique.

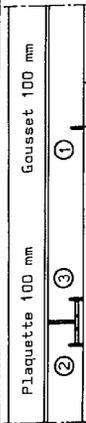
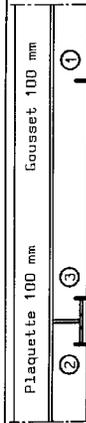
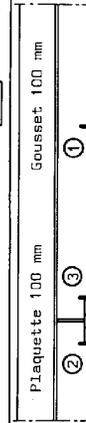
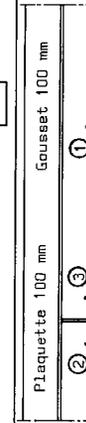
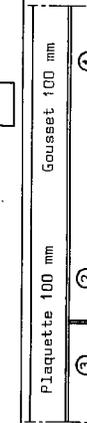
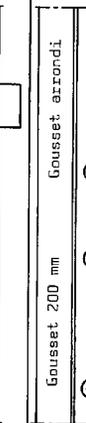
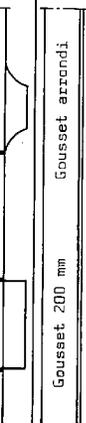
Notre gratitude va aussi à M. Maurice Fiaux qui s'est occupé du travail d'édition, des dessins et de la mise en page et enfin à Mme Geneviève Millet pour la parfaite dactylographie du texte.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Madison, R. B. and Irwin, G. R., "Fracture Analysis of King's Bridge, Melbourne", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 97, No. ST9, Sept. 1971, pp. 2229 - 2244.
- [2] Scheffey, C.F., "Point Pleasant Bridge Collapse - Conclusion of the Federal Study", Civil Engineering, Vol. 41, No. 7, July 1971, pp. 41 - 45.
- [3] Fisher, J. W., Frank, K. H., Hirt, M. A. and Mc Namee, B. M., "Effect of Weldments on the Fatigue Strength of Steel Beams", NCHRP Report No. 102, Highway Research Board, Washington, D. C., 1970.
- [4] Hirt, M. A., "Recherches américaines sur la résistance à la fatigue de poutres en âme pleine composées-soudées", Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, ICOM 001, janvier 1974.
- [5] Fisher, J. W., Albrecht, P. A., Yen, B. T., Klingermann, D. J. and Mc Namee, B. M., "Fatigue Strength of Steel Beams with Transverse Stiffeners and Attachments", NCHRP Report No. 147, Highway Research Board, Washington, D. C., 1974.
- [6] Crisinel, M., "La résistance à la fatigue des poutres en âme pleine composées-soudées, essais de 3 poutres", Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, ICOM 008, avril 1974.
- [7] Grauer, H., "Beschreibung der Rissdrahtüberwachung", Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, ICOM, décembre 1973.
- [8] Knott, J. F., "Fundamentals of Fracture Mechanics", Butterworth, London, 1973.
- [9] Hirt, M. A. and Fisher, J. W., "Fatigue Crack Growth in Welded Beams", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 5, 1973, pp. 415 - 429.
- [10] Johnson, H. H. and Paris, P. C., "Sub-critical Flaw Growth", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 1, 1968, pp. 3 - 45.
- [11] Crooker, T. W. and Lange, E. A., "How Yield Strength and Fracture Toughness Considerations can influence Fatigue Design Procedures for Structural Steels", Welding Research Supplement, Vol. 49, No. 10, Oct. 1970, pp. 488 - 496.

ANNEXE 1 : PRESENTATION DES RESULTATS D'ESSAIS

POUTRE	CONTRAINTES [N/mm^2]		N [10^3]	OBSERVATIONS	EMPLACEMENT DES FISSURES
	σ_{min}	σ_{max}			
PSR 1	20	140	1234	① Fissure à une extrémité de la plaquette Réparation	
			2355	② Fissure dans le cordon âme - aile à l'endroit d'une reprise Réparation	
			3047	③ Arrêt de l'essai Pas de fissure visible au raidisseur soudé	
PSR 2	20	140	572	① ② Fissures aux deux extrémités de la plaquette Réparation	
			673	③ Fissure à la racine de la soudure du raidisseur	
			2795	④ Arrêt de l'essai	
PSR 3	20	140	442	① Fissure à une extrémité de la plaquette	
			463	② Réparation	
			2670	③ Fissure dans le cordon âme - aile à côté du raidisseur soudé Arrêt de l'essai	
PSR 4	20	140	531	① ② Fissures aux deux extrémités de la plaquette de 200 mm	
			1308	③ Réparation	
			④ Fissures aux deux extrémités de la plaquette de 50 mm Arrêt de l'essai		
PSR 5	20	140	451	① ② Fissures aux deux extrémités de la plaquette de 200 mm	
			773	③ Réparation	
			④ Fissures aux deux extrémités de la plaquette de 50 mm Arrêt de l'essai		
PSRG 1	20	100	1922	① ② Fissures aux deux extrémités du gousset	
			2764	③ Réparation	
			④ Fissure à une extrémité de la plaquette Arrêt de l'essai		

PSRG 2	20	100	1593	① Fissure à une extrémité du gousset	
			1810	② Réparation	
			1945	③ Fissures aux deux extrémités de la plaquette Arrêt de l'essai	
PSRG 3	20	140	398	① Fissure à une extrémité du gousset	
			514	② Réparation	
			523	③ Fissures aux deux extrémités de la plaquette Fin de l'essai	
PSRG 4	20	140	301	① Fissure à une extrémité du gousset	
			361	② Réparation	
			519	③ Fissures aux deux extrémités de la plaquette Fin de l'essai	
PSRG 5	20	180	170	① Fissure à une extrémité du gousset	
			210	② Réparation	
			216	③ Fissures aux deux extrémités de la plaquette Fin de l'essai	
PSRG 6	20	180	142	① Fissure à une extrémité du gousset	
			199	② Réparation	
			271	③ Fissures aux deux extrémités de la plaquette Arrêt de l'essai	
PSG 1	20	140	249	① ② Fissures aux deux extrémités du gousset rectangulaire	
			297	③ Réparation	
			612	Fissure à une extrémité du gousset arrondi Fin de l'essai	
PSG 2	20	140	224	① ② Fissures aux deux extrémités du gousset rectangulaire	
			307	③ Réparation	
			1719	Arrêt de l'essai Pas de fissure visible au gousset arrondi	
PSG 3	20	140	222	① Fissure à une extrémité du gousset rectangulaire	
			726	② Réparation	
			③ Fissure à une extrémité du gousset arrondi Arrêt de l'essai		

ANNEXE 2 : RESUME DES RESULTATS SELON DETAILS CONSTRUCTIFS

DETAIL CONSTRUCTIF		POUTRE		$\Delta\sigma$ 1)	FISURE	PREMIERE OBSERVATION 2)		OBSERVATION FINALE 3)		
Type	L [mm]	no	[N/mm ²]	no	no	N [10 ³]	Schéma	N [10 ³]	Schéma	
POUTRE COMPOSEE-SOUDEE Cordon longitudinal âme - aile		PSR 1	120	②				2355	Reprise de soudure	
		PSR 1	120	—				3047	Pas de fissure Recine de la soudure Cordon âme - aile	
		PSR 2	120	③				2795		
RAIDISSEUR SOUDE A L'AILE TENDUE Cordon transversal	50	PSR 3	120	③				2670		
		PSR 1	120	①				1234		
RAIDISSEUR AVEC PLAQUETTE	100	PSR 4	120	③				1308		
		PSR 5	120	③				773		
		PSRG 1	80	③					2764	
		PSRG 2	80	②					1945	
		PSR 2	120	②	572				673	
		PSRG 3	120	②	523				617	
PSRG 4	120	②	519				612			
PSRG 5	160	②	216				261			
PSRG 6	160	②	160				271			

RAIDISSEUR AVEC PLAQUETTE	PSR 3	120	①	442			463	
	PSR 4	120	②				531	
	PSR 5	120	①				451	
GOUSSET RECTANGULAIRE	PSRG 1	80	①				1922	
	PSRG 2	80	①	1593			1810	
	PSRG 3	120	①	398			514	
	PSRG 4	120	①	301			361	
	PSRG 5	160	①	170			210	
	PSRG 6	160	①	142			199	
GOUSSET ARRONDI	PSG 1	120	①	249			297	
	PSG 2	120	①	224			307	
	PSG 3	120	①				222	
GOUSSET ARRONDI	PSG 1	120	③	612			798	
	PSG 2	120	—				1719	
	PSG 3	120	②				726	

1) $\Delta\sigma$: différence de contraintes à la fibre supérieure de l'aile inférieure de la poutre. $\sigma_{min} = 20 \text{ N/mm}^2$; $\sigma_{max} = \sigma_{min} + \Delta\sigma$.
 2) Première détection de la fissure, peut correspondre à l'observation finale en cas de grande fissure.
 3) Au moment de la réparation pour le premier détail fissuré et à la fin de l'essai pour le second détail (voir ANNEXE 1).