

COMPORTEMENT À LA FATIGUE D'UN ASSEMBLAGE SOUDÉ EN FONCTION DU TYPE D'ÉLECTRODE

par P. TANNER, V. DUBOIS et M. A. HIRT

1. — INTRODUCTION

Dans les constructions métalliques, on utilise de plus en plus des matériaux à haute résistance pour économiser de la matière, souvent avec le but de réduire le poids des éléments. Les sollicitations dues aux charges de service sont ainsi plus élevées, ce qui a pour conséquence de faire apparaître plus facilement des fissures de fatigue. En effet, la résistance à la fatigue d'assemblages soudés n'augmente pas avec la résistance à la traction du matériau, mais dépend des contraintes résiduelles introduites par le soudage, de la géométrie du cordon de soudure et des microfissures se situant au pied du cordon. Il a été observé que les cordons effectués avec des électrodes rutiles présentent un plus bel aspect que ceux soudés avec des électrodes basiques; c'est-à-dire que la géométrie des cordons de soudure effectués avec des électrodes rutiles paraît moins sensible aux problèmes de fatigue.

Le but principal de cette recherche pilote, qui a été proposée par Giovanola Frères S. A. à Monthey, est donc de mettre en évidence une éventuelle amélioration du comportement à la fatigue des assemblages soudés avec des électrodes rutiles par rapport aux assemblages soudés avec des électrodes basiques.

Dans le cadre d'une thèse de doctorat [1], un joint soudé a été testé en utilisant des éprouvettes soudées avec les deux

types d'électrodes susmentionnées. Les résultats obtenus ne permettent toutefois pas de faire une comparaison de leur comportement à la fatigue, car un seul essai a été effectué avec une éprouvette non traitée, soudée avec une électrode rutile. Peu de résultats concernant ce sujet sont disponibles dans la littérature spécialisée. Dans [2], il est mentionné qu'il n'y a pas de différence significative de durée de vie selon le type d'électrode utilisé (rutile ou basique). Ceci n'est cependant valable que pour l'assemblage et les conditions de chargement considérés.

Si à l'occasion de cette étude une différence de la durée de vie devait se présenter entre les éprouvettes soudées avec des électrodes basiques (par la suite appelées éprouvettes basiques) et celles soudées avec des électrodes rutiles (éprouvettes rutiles), il serait alors intéressant de savoir si elle se manifeste lors de l'initiation de la fissure ou lors de sa propagation. Afin de déterminer le comportement de la fissuration, des mesures peuvent être effectuées au moyen de deux systèmes de mesures développés à l'ICOM qui permettent d'une part de suivre la propagation des fissures tout au long de la durée de vie et d'autre part d'observer la contrainte d'ouverture de la fissure au cours d'un cycle.

2. — PROGRAMME D'ESSAIS

2.1. — Éprouvettes

Le choix du détail de construction, ainsi que de ses dimensions, a été dicté par les résultats déjà disponibles à l'ICOM. Ces dernières années notre institut a effectué plusieurs études dans le domaine de la fatigue des assemblages soudés. La première s'est réalisée dans le cadre du projet N° 7 du Fonds National [3]. Elle consistait à étudier le comportement à la fatigue d'assemblages soudés à l'aide de trois

P. Tanner — Ingénieur civil diplômé EPFZ/SIA, collaborateur scientifique

V. Dubois — Ingénieur civil diplômée EPFL/SIA

M. A. Hirt — Dr ès sciences, ingénieur civil diplômé EPFZ/SIA, professeur École Polytechnique, Fédérale de Lausanne, Suisse. ICOM — Construction métallique

types d'éprouvettes de grandes dimensions. Un des trois types a ensuite été choisi pour une étude approfondie [1]. Il s'agissait d'un joint composé de goussets soudés longitudinalement sur une plaque de base (fig. 1). Pour l'étude [1], deux longueurs de goussets ont été utilisées, à savoir 100 mm et 200 mm. Pour ces deux longueurs de goussets, les éprouvettes ont été équipées du système de mesure de la propagation des fissures. Le système de mesure de la contrainte d'ouverture des fissures a été installé uniquement sur les éprouvettes avec les goussets longs de 200 mm. Ce sont donc ces dernières éprouvettes qui ont été étudiées le plus en détail et celles pour lesquelles on possède un maximum de renseignements utiles pour la présente étude. Notre choix s'est donc arrêté sur ces éprouvettes.

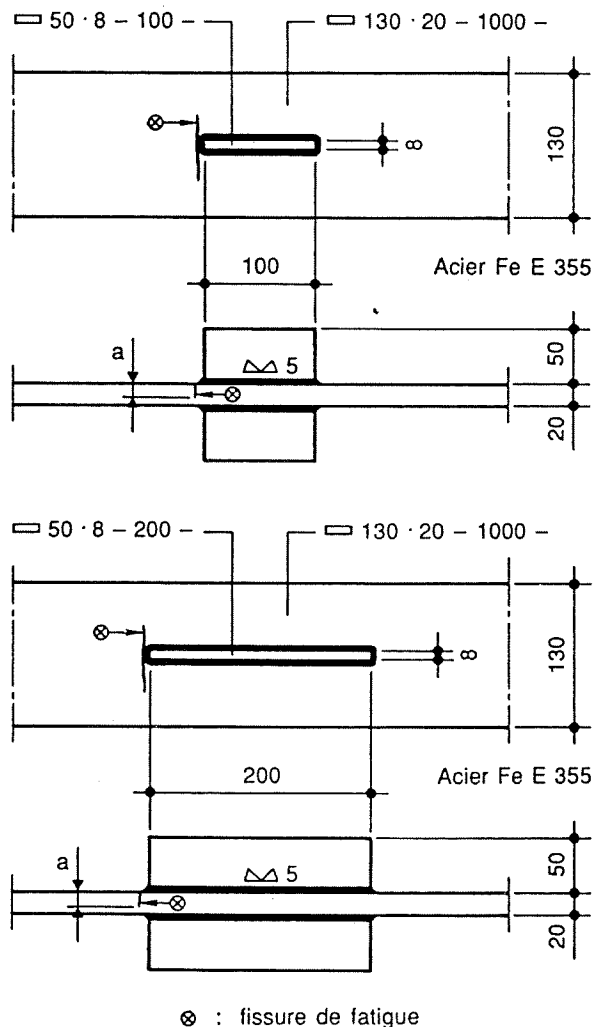


Fig. 1 — Géométrie des éprouvettes utilisées (dimensions en mm, longueur totale des éprouvettes : 1'000 mm), tiré de [1]

Les dimensions de la plaque de base sont de 130 × 20 mm (fig. 1), et sa longueur est de 1'000 mm. Deux goussets de 200 mm ont été prévus de part et d'autre de la plaque de base dans son axe longitudinal afin d'éviter une flexion de l'éprouvette due à un assemblage asymétrique. La hauteur des goussets a été choisie à 50 mm parce que des analyses avaient montré que le niveau de concentration des contraintes à l'endroit de la fissuration reste constant à partir de cette valeur [4]. L'épaisseur des goussets est de 8 mm.

Les éprouvettes ont été fabriquées à partir d'une plaque d'acier Fe 510. C'est un acier de construction à haute

résistance largement utilisé dans la pratique. Il est désigné par Fe E 355 dans la nouvelle norme SIA 161/1990 [5]. Les deux types d'électrodes utilisés, convenant au matériau de base, étaient les suivants :

- électrode basique, Sécheron-IDEAL, conforme au standard AWS E 7016,
- électrode rutile, Sécheron-EXOBEL, conforme au standard AWS E 6013.

Les éprouvettes testées lors de la présente étude ont été fabriquées à deux reprises au cours de la recherche dans les ateliers de Giovanola Frères S.A. à Monthey. Les plaques de base ont été découpées dans une tôle ayant les mêmes caractéristiques que celle utilisée pour les éprouvettes de l'étude [1]. Les goussets ont été chanfreinés à 45° sur les deux faces d'un grand côté. Ils ont été reliés à une plaque de base par une soudure complètement pénétrée de 45° de pente nominale et entourant complètement les goussets. En effectuant une soudure complètement pénétrée au lieu d'un cordon d'angle, on voulait éviter que les fissures de fatigue s'initient à la racine de la soudure ce qui aurait rendu impossible l'utilisation des systèmes de mesure mentionnés. Toutes les soudures ont été effectuées par le même soudeur. La même procédure de soudage a été adoptée que pour les éprouvettes de [1]; c'est-à-dire que toutes les passes de soudage ont été effectuées alternativement sur les deux faces de la plaque de base. Ainsi, les déformations de l'éprouvette dues au refroidissement ont été réduites.

Le remplissage des chanfreins des éprouvettes rutilés a été effectué avec une électrode basique, tandis que le cordon d'angle a été déposé à l'aide d'une électrode rutile. Pour les éprouvettes basiques, le remplissage des chanfreins et le cordon d'angle ont été faits avec une électrode basique. Les éprouvettes n'ont pas été redressées après leur refroidissement et n'ont été soumises qu'à un contrôle de qualité visuel.

2.2. — Choix des sollicitations

Dans le cadre de la thèse de doctorat [1], la plupart des essais de fatigue a été effectué avec une étendue de contrainte (dénommée différence de contraintes dans [5]) $\Delta\sigma = 180 \text{ N/mm}^2$. Afin de pouvoir comparer ces résultats avec ceux de la présente étude, la même étendue de contrainte est choisie pour une première étape du programme de recherche (voir 2,3). Si une différence du comportement à la fatigue entre les deux types d'électrodes peut être envisagée au niveau de l'initiation de la fissure, son influence sera plus importante pour un niveau de charge plus faible. Pour ne pas obtenir des durées d'essais trop longues, une étendue de contrainte $\Delta\sigma = 100 \text{ N/mm}^2$ est adoptée pour une deuxième étape de cette recherche. Ceci malgré le fait qu'aucun résultat n'était disponible pour cette étendue de contrainte. Avec des résultats pour deux niveaux différents d'étendue de contrainte, le calcul d'une loi de résistance à la fatigue devrait être possible. Pour tous les essais, le rapport de contrainte $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ est choisi égal à 0.1.

2.3. — Scénarios d'essais possibles

Comme nous l'avons mentionné dans le paragraphe précédent, deux niveaux distincts d'étendues de contrainte sont prévus : premièrement un niveau élevé et deuxièmement un

niveau intermédiaire par rapport à la limite de fatigue du détail étudié ($\Delta\sigma_D = 37 \text{ N/mm}^2$ selon [5] et [6], voir figure 4). Cette étude commence par des essais dénommés « normaux », c'est-à-dire par des essais de fatigue jusqu'à la rupture complète de l'éprouvette, sans mesure ni de la propagation de la fissure, ni de la contrainte d'ouverture de la fissure pendant la durée de vie. Dans un premier temps, trois éprouvettes de chaque type sont testées avec une étendue de contrainte $\Delta\sigma = 180 \text{ N/mm}^2$ et un rapport $R = 0.1$. La suite du programme de recherche est fonction des résultats de ces premiers essais. Les différentes variantes sont représentées dans l'organigramme de la figure 2.

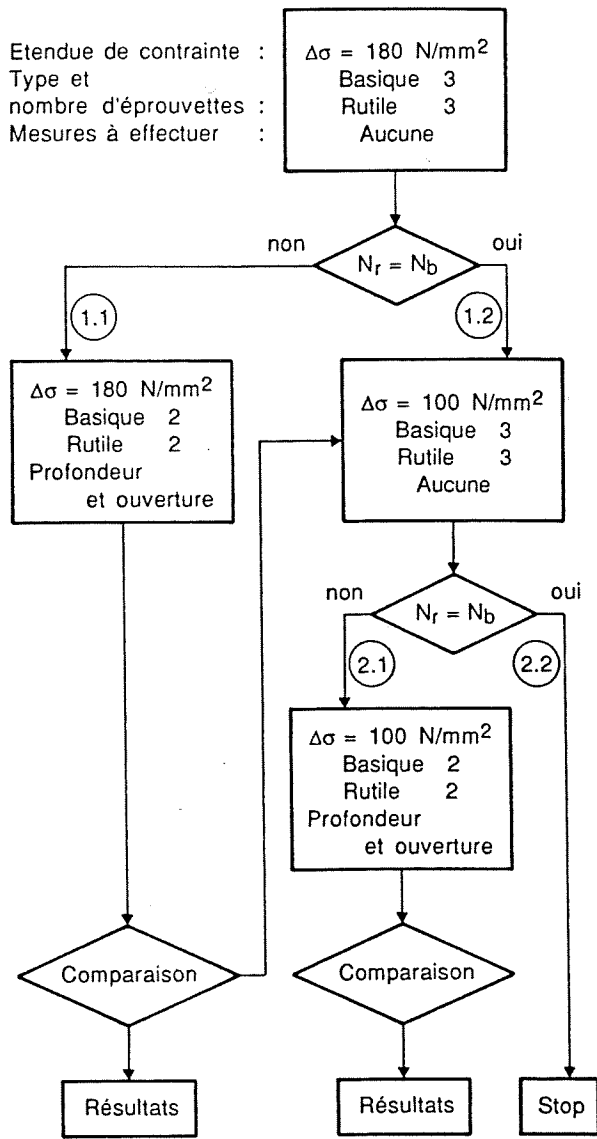


Fig. 2 — Organigramme du programme d'essais

Première étape

Variante 1.1 : Le nombre de cycles à la rupture des éprouvettes rutilles (N_r) n'est pas égal à celui des éprouvettes basiques (N_b). Dans ce cas là, le programme prévoit de tester deux nouvelles éprouvettes de chaque type. Elles seront équipées des deux systèmes de mesure, afin de déterminer à quel moment de la durée de vie peut être attribuée cette différence. Ensuite, une étude à une autre étendue de contrainte, plus basse, s'avère utile (deuxième étape) pour vérifier

si la même amélioration peut être observée et pour rendre possible le calcul d'une loi de résistance à la fatigue.

Variante 1.2 : Les résultats de toutes les éprouvettes testées tombent dans la dispersion des résultats d'essais de fatigue. Dans ce cas le programme propose de comparer les durées de vie des deux types d'éprouvettes à un niveau de contrainte plus bas, c'est-à-dire à $\Delta\sigma = 100 \text{ N/mm}^2$ (deuxième étape).

Deuxième étape

Variante 2.1 : La deuxième étape débute par une comparaison du nombre de cycles à la rupture entre trois éprouvettes basiques et trois éprouvettes rutilles à une étendue de contrainte $\Delta\sigma = 100 \text{ N/mm}^2$. Si la durée de vie des éprouvettes rutilles n'est pas égale à celle des éprouvettes basiques, on propose de tester deux éprouvettes de chaque type, entièrement équipées avec les deux systèmes de mesure. Les résultats de ces essais permettraient de déterminer à quel moment de la durée de vie peut être attribuée cette différence et d'en tirer les conclusions nécessaires.

Variante 2.2 : Les résultats de tous les essais tombent dans la même dispersion. La conclusion est que les assemblages soudés avec des électrodes rutilles ont la même résistance à la fatigue que ceux soudés avec des électrodes basiques.

3. — ESSAIS DE FATIGUE

Les essais de fatigue sont effectués sur la même machine servohydraulique utilisée pour les essais de [1]. Elle a une capacité statique de $\pm 1'000 \text{ kN}$ et une capacité dynamique de $\pm 800 \text{ kN}$. L'éprouvette est serrée dans la machine à l'aide de mâchoires hydrauliques. Tous les essais sont contrôlés en force suivant une fonction de commande sinusoïdale. La fréquence est choisie à 10 Hz pour tous les essais.

Toutes les éprouvettes sont équipées de jauges d'extensométrie électriques pour vérifier les charges appliquées (fig. 3). Ces jauges sont placées sur les deux faces de la plaque de

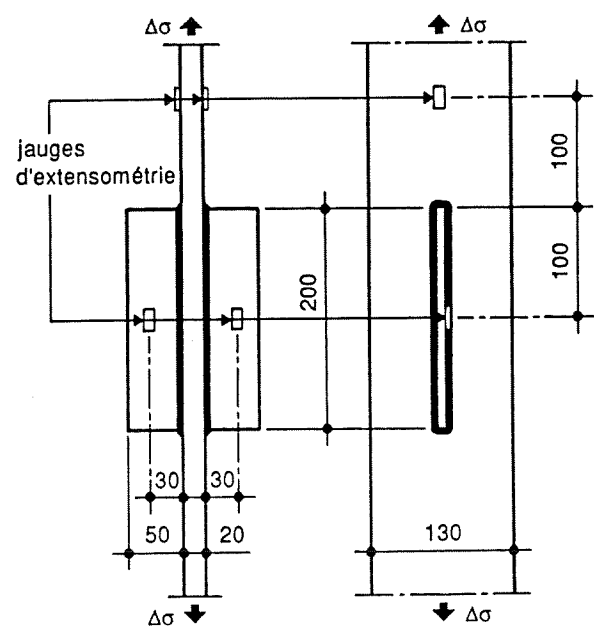


Fig. 3 — Emplacement des jauges d'extensométrie électriques collées sur les éprouvettes

base à 100 mm de l'extrémité des goussets, de manière à ce que les mesures ne soient pas influencées par ces derniers. Des jauges sont également collées à mi-longueur des goussets sur une de leurs faces à une distance de 30 mm de la surface de la plaque de base. Celles-ci servent à détecter une éventuelle flexion de l'éprouvette pendant le serrage des mâchoires de la machine et pendant le chargement.

Les sections des éprouvettes, mesurées manuellement, permettent de déterminer les charges nominales à appliquer. Les contraintes mesurées dans la plaque de base lors du chargement ont toujours été supérieures aux contraintes nominales, mais au maximum d'environ 5 %. Ceci peut s'expliquer par le fait que les surfaces étaient meulées avant le collage des jauges. La flexion des éprouvettes au niveau des goussets peut être exprimée en pourcentage de la contrainte moyenne donnée par les jauges collées sur les goussets. Pour la plupart des éprouvettes cette flexion a été faible; à la charge maximale elle n'a jamais été plus grande que 12 %. Ainsi, une correction des conditions de chargement ne s'avère pas nécessaire, d'autant plus que cette flexion est beaucoup plus petite au niveau de la plaque de base.

4. — RÉSULTATS

Dans le premier paragraphe, un résumé des 12 essais de fatigue effectués dans le cadre de cette étude est donné sous forme d'un tableau. Dans le second paragraphe, les durées de vie des éprouvettes rutilles et basiques testées seront comparées à l'aide d'une représentation graphique. Une comparaison sera également faite avec des résultats tirés de [1].

4.1. — Résultats des essais

À part les résultats des essais effectués dans le cadre de la présente étude (nombre de cycles N jusqu'à la rupture de l'éprouvette), le tableau 1 contient les valeurs moyennes du nombre de cycles (m_N) et les écarts types sur le nombre de cycles (s_N): la colonne 6 donne ces valeurs par groupe de trois essais, tandis que la colonne 7 les donne par groupe de six essais, c'est-à-dire par étape de la recherche.

TABLEAU 1

Résultats des essais de fatigue effectués pour cette étude
($R = 0.1$)

Étape	Éprouvette	Électrode	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	N [cycles]	m_N [cycles] s_N	m_N [cycles] s_N
1	R1	rutille	180	170'300	191'200 0.05	184'800 0.06
	R2	rutille	180	203'000		
	R3	rutille	180	200'400		
	B1	basique	180	220'300	178'300 0.10	
	B2	basique	180	159'300		
	B3	basique	180	155'400		
2	R11	rutille	100	1'454'500	1'403'100 0.02	1'240'000 0.08
	R12	rutille	100	1'364'700		
	R13	rutille	100	1'390'100		
	B11	basique	100	1'001'200	1'076'900 0.07	
	B12	basique	100	956'200		
	B13	basique	100	1'273'200		

4.2. — Comparaison et analyse des résultats

Un contrôle visuel des soudures a permis de faire l'observation suivante : par rapport aux éprouvettes basiques, le cordon de soudure des éprouvettes rutilles montre une géométrie moins sensible aux problèmes de fatigue sur les grands côtés des goussets, c'est-à-dire qu'à cet endroit les cordons des soudures effectuées avec des électrodes rutilles sont plus arrondis. Par contre, aux deux extrémités des goussets où il est difficile d'effectuer une soudure et où les fissures sont susceptibles d'apparaître, la différence entre les géométries des cordons de soudure pour les deux types d'électrode semble petite (contrôle visuel). Par conséquent il faut s'attendre, pour cet endroit, au même ordre de grandeur de la concentration de contrainte due à la discontinuité géométrique pour les deux types d'éprouvettes.

La figure 4 donne la durée de vie en fonction de l'étendue de contrainte. Sur ce diagramme sont tout d'abord représentés les résultats des essais de cette étude, ainsi que la courbe de résistance à la fatigue selon [5] et [6] pour la catégorie du détail traité.

Pour les éprouvettes testées lors de la première étape de la présente recherche, c'est-à-dire avec $\Delta\sigma = 180$ N/mm², on peut faire les constatations suivantes :

- La plus longue durée de vie a été observée pour l'éprouvette B1, donc pour une des éprouvettes basiques.

- Les deux plus courtes durées de vie ont été observées pour les deux autres éprouvettes basiques testées à ce niveau de charge.

- Les résultats pour les éprouvettes rutilles se trouvent entre les valeurs extrêmes obtenues pour les éprouvettes basiques. La valeur moyenne de la durée de vie des trois éprouvettes rutilles est de 191'200 cycles contre 178'300 cycles pour les éprouvettes basiques, soit une différence d'environ 7 %.

- La dispersion des résultats des six éprouvettes testées est petite (écart type sur le nombre de cycles $s_N = 0.06$).

- Les durées de vie de toutes les éprouvettes sont nettement supérieures à celles données par la courbe de résistance selon la norme.

À une étendue de contrainte $\Delta\sigma = 180$ N/mm², le comportement à la fatigue des éprouvettes rutilles et celui des éprouvettes basiques est donc identique, ce qui correspond à la variante 1.2 de la figure 2. Par conséquent, on a procédé par la suite de la manière prévue dans le programme de recherche, c'est-à-dire en comparant la durée de vie de chacun des deux types d'éprouvettes à un niveau de contrainte plus bas.

Pour une étendue de contrainte $\Delta\sigma = 100$ N/mm², les durées de vies obtenues pour les éprouvettes rutilles montrent une tendance à être plus longues que celles des éprouvettes basiques. En effet, le nombre de cycles à la rupture de toutes les éprouvettes rutilles est plus élevé que celui des éprouvettes basiques. Ceci se traduit par des pentes différentes des droites de régression linéaire dans la représentation à échelle bilogarithmique de la figure 4 : ces pentes sont égales à respectivement 3.39 et 3.06 pour les résultats obtenus pour les éprouvettes rutilles et basiques. Cependant, l'augmentation de la durée de vie est petite : le facteur d'amélioration, calculé comme le rapport entre la durée de vie des différentes éprouvettes rutilles et la moyenne de la durée de vie des éprouvettes basiques se situe entre 1.26 et 1.35. Rappelons que ceci n'est valable que pour une étendue de contrainte $\Delta\sigma = 100$ N/mm². Une étude sur l'amélioration du comportement à la fatigue d'assemblages soudés à l'aide de

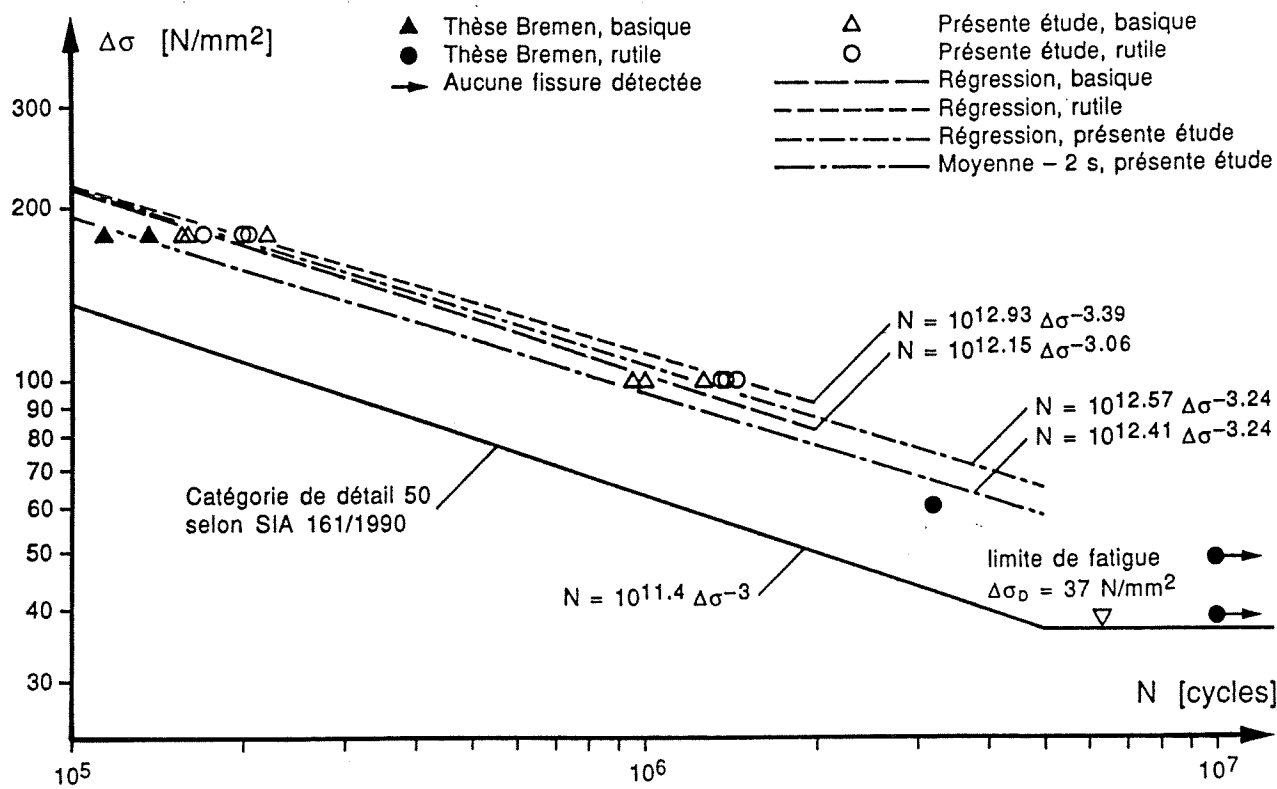


Fig. 4 — Durées de vie des éprouvettes testées et comparaison avec les résultats de l'étude [1]

différents traitements agissant sur les contraintes résiduelles au pied du cordon [1] avait montré que le facteur d'amélioration pouvait atteindre des valeurs supérieures à 10 suivant le traitement. Par rapport à ces valeurs, un facteur d'amélioration d'environ 1.3 est négligeable et peut donc être expliqué par la dispersion des résultats des essais de fatigue. L'écart type sur le nombre de cycles, calculé pour les résultats des trois éprouvettes rutiles testées à une étendue de contrainte $\Delta\sigma = 100 \text{ N/mm}^2$, se monte à une valeur de 0.02 (tableau 1). La valeur correspondante pour les trois éprouvettes basiques est de 0.07, et celle pour toutes les six éprouvettes testées à $\Delta\sigma = 100 \text{ N/mm}^2$ de 0.08. Ces écarts types sont plutôt petits pour des essais de fatigue, car l'ordre de grandeur est habituellement de 0.10 à 0.25 selon [6].

La figure 4 montre également une régression linéaire sur tous les résultats obtenus lors de la présente étude. Une pente égale à 3.24 a été trouvée. De même, l'écart type sur le nombre de cycles a été calculé. Avec une valeur de 0.08 il est petit pour des essais de fatigue. Une droite représentant la régression sur tous les résultats moins deux fois l'écart type est donnée.

En plus des résultats de cette étude, la figure 4 représente ceux obtenus lors du travail [1]. On observe que pour une étendue de contrainte $\Delta\sigma = 180 \text{ N/mm}^2$, les durées de vie de toutes les éprouvettes de la présente recherche sont légèrement supérieures à celles tirées de [1]. On note également que deux des résultats tirés de [1] tombent en dessous de la droite représentant la régression sur tous les résultats de la présente étude moins deux fois l'écart type. Cette comparaison montre que la dispersion des résultats obtenus lors de la présente recherche est petite par rapport à celle que l'on peut observer habituellement pour des essais de fatigue. On peut ainsi conclure que les résultats de tous les essais tombent dans la même dispersion, et que le comportement à la fatigue des éprouvettes rutiles et basiques ne montre aucune différence significative, ce qui correspond à la variante 2.2 de la figure 2.

5. — RÉCAPITULATION ET CONCLUSION

Le but de cette étude consistait à savoir si le comportement à la fatigue d'un joint soudé pouvait être amélioré en utilisant des électrodes rutiles à la place des électrodes basiques. Un détail de construction a été choisi sur la base d'une certaine expérience obtenue lors de recherches précédentes, concernant sa fabrication et l'exécution des essais de fatigue. Ce type d'éprouvette consistait en une plaque de base sur laquelle deux goussets longitudinaux ont été soudés. Quelques résultats utiles pour cette étude étaient donc déjà disponibles.

Des essais ont été effectués sur deux niveaux d'étendues de contrainte. Lors d'une première étape, trois éprouvettes de chaque type ont été testées à une étendue de contrainte $\Delta\sigma = 180 \text{ N/mm}^2$, jusqu'à la rupture complète. Ensuite, comme deuxième étape, trois éprouvettes de chaque type ont été soumises à une étendue de contrainte $\Delta\sigma = 100 \text{ N/mm}^2$. Ces essais ont permis de faire les observations suivantes :

1. A une étendue de contrainte $\Delta\sigma = 180 \text{ N/mm}^2$, aucune différence du comportement à la fatigue entre les éprouvettes soudées avec des électrodes rutiles et celles soudées avec des électrodes basiques n'a pu être observée.
2. A une étendue de contrainte $\Delta\sigma = 100 \text{ N/mm}^2$, une très légère amélioration du comportement à la fatigue des éprouvettes rutiles par rapport aux assemblages basiques a pu être observée. Pourtant, l'amélioration est trop petite pour que l'on puisse dire que les résultats ne tombent pas dans la même dispersion.
3. La pente de la droite de régression calculée sur la totalité des essais effectués est égale à 3.24 dans une représentation à échelle bilogarithmique. Avec une valeur de 0.08, l'écart type sur le nombre de cycles est petit. C'est-à-dire que tous les résultats tombent dans une dispersion étroite pour des essais de fatigue, ce qui est confirmé par une comparaison

avec les résultats d'une étude antérieure [1]. Par rapport à cette même étude tous les résultats obtenus montrent des durées de vie plus élevées.

4. Les durées de vie de toutes les éprouvettes testées lors de la présente étude se situaient au-dessus de la courbe de résistance à la fatigue de la catégorie du détail examiné selon la nouvelle norme SIA 161/1990.

Sur la base des résultats obtenus, la principale conclusion pouvant être formulée est la suivante : pour les conditions d'essais réalisés, l'utilisation d'électrodes rutiles à la place d'électrodes basiques n'a pas d'effet dont on pourrait tenir compte lors d'un dimensionnement à la fatigue du joint soudé. Des paramètres autres que la géométrie et la métallurgie des cordons de soudure, tels que les défauts initiaux et les contraintes résiduelles, semblent prédominants.

REMERCIEMENTS

Nos remerciements s'adressent tout d'abord à l'entreprise Giovanalo Frères S. A. à Monthey, particulièrement à **Monsieur Claude Giovanola**, chef du département « Contrôle de qualité », pour l'intérêt manifesté, ainsi que pour la fabrication et la mise à disposition des éprouvettes. Les auteurs tiennent également à remercier les membres de l'ICOM — Construction métallique qui ont participé à cette étude et à l'élaboration de ce rapport.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Bremen U.** — *Amélioration du comportement à la fatigue d'assemblages soudés : étude et modélisation de l'effet de contraintes résiduelles*. Lausanne, École polytechnique fédérale, 1989 (Thèse EPFL n° 787).
- [2] **Gurney T. R.** — *Some variable amplitude fatigue tests on fillet welded joints*. In : International Conference on Fatigue of Welded Constructions, Brighton, England, 7-9 April 1987. Edited by S. J. Maddox. Cambridge, The Welding Institut, 1988 (Paper 65).
- [3] **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, Dübendorf, vol. 13, n° 1, 1985, p. 28-35.
- [4] **Smith I. F. C., Gurney T. R.** — *Changes in the fatigue life of plates with attachments due to geometrical effects*. Welding Journal, research supplement, Miami, vol. 65, n° 9, p. 244s-250s, 1986.
- [5] **Société Suisse des ingénieurs et des architectes**. Norme SIA 161 : Constructions métalliques, édition de 1990. Zürich, SIA, 1990.
- [6] **ECCS/CECM/EKS.** — *Recommandations pour la vérification à la fatigue des structures en acier*. Saint-Rémy-lès-Chevreuse, Centre Technique Industriel de la Construction Métallique, 1987 (Publication CECM n° 43).