



12

F

G

K

S

G

E

G

A

FATIGUE ET CONSTRUCTIONS TYPES

Recherche - D a l m i n e



D A L M I N E S.p.A.

// R A P P O R T F I N A L
de la recherche //

/ F A T I G U E E T C O N S T R U C T I O N S T Y P E S /

// Travail réalisé avec l'aide financière prévue
par l'article 55 du traité de la

C. E. C. A. //

Convention n° 6210/25/070 du 27 juin 1966
doc. N° 8315/1/65 CECA

Commission des Communautés Européennes

- Décembre 1969 -

F. RINALDI^{+) - A. PUGNO^{+) -}}

RESISTANCE A LA FATIGUE EN TRACTION ONDULEE
DE JOINTS TUBULAIRES SOUDES BOUT A BOUT

Résumé: Le mémoire présente les résultats d'un programme d'essais de fatigue entrepris en laboratoire sur éprouvettes tubulaires soudées bout à bout en acier à haute limite d'élasticité (Fe E 36 C3 de l'Euronorm 25).

L'étude avait été envisagée pour étudier directement à l'échelle 1 : 1 la résistance à la fatigue d'un élément de construction utilisé couramment pour des treillis métalliques réalisés à l'aide de tubes de longueurs courantes. La dimension de l'éprouvette (\varnothing 100 mm) a été choisie de façon à permettre d'extrapoler les résultats à la réalisation pratique de constructions de grandes dimensions.

On a fait des essais en traction ondulées (deux valeurs de R: 0 et 0,4) des joints soudés par un procédé couramment employé en atelier et sur le chantier; connaissant l'influence de la géométrie du joint sur sa tenue en fatigue, on a utilisé trois procédés différents pendant la première passe.

<sup>+) Doct. Ing. - Laboratoires de Recherche de
DALMINE S.p.A.</sup>

Le soudage, effectué pendant un temps très long - c'est-à-dire sur peu d'éprouvettes à la fois - a été réalisé sans préchauffage en axe horizontal fixe, suivant un cahier de spécifications bien détaillées également en ce qui concerne les critères d'acceptation des défauts.

On a analysé au total 186 éprouvettes, dont 72 dans la région de la pente de la courbe de Wöhler. Le programme, envisagé pour l'exploitation statistique des données, a fourni un ensemble de résultats suffisant pour établir le niveau des sollicitations admissibles dans les applications pratiques de joints tubulaires soudés sans reprise à l'envers.

Parmi les méthodes utilisées pendant la première passe, l'emploi de la bague support a donné les résultats les meilleurs. L'électrode à enrobage cellulosique vient en deuxième place. Le procédé T.I.G., permettant de réaliser un cordon de pénétration très régulier - procédé qui pourtant paraissait tout d'abord la solution à choisir comme référence la meilleure lors de la comparaison - a donné la limite d'endurance la plus basse: cela peut être expliqué par l'affaiblissement introduit par l'alésage du chanfrein et par le manque d'homogénéité du cordon dû à la position de la soudure. Des essais supplémentaires, effectués sur des éprouvettes similaires mais sans cordon de pénétration, obtenues par remplissage d'une rainure circulaire, ont permis de confirmer l'influence déterminante de la forme du cordon sur le comportement à la fatigue des joints soudés.

Les ruptures par fatigue se sont amorcées au raccordement entre cordons et métal de base mais jamais près de

défauts situés à l'intérieur du cordon. Les facteurs métallurgiques et les contraintes résiduelles n'ont démontré aucune influence remarquable en présence d'irrégularités de profil.

L'exploitation statistique des données obtenues dans la région de la pente de la courbe de Wöhler a permis d'acquérir un grand nombre d'informations: la position des valeurs individuelles des durées de vie est connue avec une dispersion (écart-type) de 39%. Les limites de confiance à 95% de la position des droites de régression sont cependant fixées à $\pm 6,5 \pm 8\%$ de la moyenne pour des groupes de 18 ou 9 données respectivement.

L'expérience a démontré que pour expliquer la variation des durées de vie aux divers niveaux de contrainte, on peut avoir recours à une loi linéaire dans le domaine étudié avec une pente uniforme pour tous les procédés examinés, à condition d'employer la transformation logarithmique aussi bien pour les durées de vie que pour les contraintes appliquées. L'extrapolation des droites ainsi obtenues à 2 millions de cycles donne des limites calculées en bon accord avec les limites d'endurance expérimentales.

I N T R O D U C T I O N

Les grandes constructions métalliques en structures tubulaires exigent assez fréquemment l'application de joints bout à bout, qui représentent un point d'affaiblissement si, lors de l'emploi, sont prévues des charges dynamiques importantes. Dans ce cas, sur les plans, on cherche à situer les joints dans les positions les moins défavorables, on envisage des renforcements locaux des sections intéressées ou bien on a recours à des techniques particulières (E. LISTER et D.H. WOODWARD (1); M.G. DAWES (2)).

L'ingénieur du bureau technique est cependant toujours intéressé à connaître le comportement à la fatigue des joints et en particulier des joints soudés par des procédés applicables sur le chantier. Cet intérêt s'accroît naturellement si l'on doit employer - comme il arrive très souvent aujourd'hui - des aciers à haute limite élastique, pour pouvoir en exploiter au maximum les avantages qu'on obtient du point de vue statique.

Dans les structures en treillis tubulaires - pour des voies de ponts-roulants ou de grandes oeuvres de charpente, telles les plate-formes de forage en mer - les joints bout à bout des éléments en tube sont fréquemment soumis aux sollicitations axiales; le poids de la construction est important et des charges dynamiques se superposent en donnant lieu à une sollicitation ondulée. Dans les treillis des engins de levage on peut également se trouver en présence d'oscillations de contrainte très élevées.

Pour résoudre les problèmes qui se posent au moment

de l'élaboration des projets de ce genre de constructions, on ne peut certainement pas utiliser les données existantes obtenues par des essais de fatigue en traction - compression effectués sur des éprouvettes de petites dimensions, tirées de tôles soudées bout à bout avec reprise à l'envers, dont la littérature technique est si riche.

Quelques essais sur les joints tubulaires ont déjà été effectués mais presque toutes les données repérables ont été obtenues par flexion: cependant, s'il s'agit de flexion plane, les résultats de ces essais ne peuvent pas être utilisés puisqu'ils se réfèrent à la résistance en un seul point de la circonférence du joint, là où la contrainte en traction est maximale.

Il ne resterait donc plus que la possibilité d'utiliser les résultats des essais exécutés en flexion rotative (2), mais ce mode d'application des contraintes peut conduire à la détermination d'une limite d'endurance plus élevée que celle trouvée par sollicitation axiale.

Le présent travail s'est donc fixé pour but d'acquérir des données suffisantes afin de préciser la tenue en fatigue sous contrainte axiale des joints tubulaires soudés d'utilisation courante.

E C H E L L E D E L ' E P R O U V E T T E

Pour établir le programme d'essai, on a tout d'abord dû choisir une éprouvette de forme et dimensions adéquates

pour atteindre le but exposé ci-dessus. A.M. FREUDENTHAL (3), en examinant l'applicabilité des résultats des essais sur des matériaux en structures soudées, est parvenu à la conclusion qu'une estimation quantitative de l'endurance ne peut être déduite que d'essais en vraie grandeur sur des constructions entières ou, au moins, sur des éléments essentiels de ces constructions.

Dans cet esprit, on a décidé d'opérer à l'échelle 1 : 1 sur des éléments de construction utilisés couramment pour les treillis tubulaires: en plus, le diamètre des tubes (100 mm) a été établi de façon que les essais puissent être conduits en traction ondulée sur des cordons de soudure suffisamment développés pour simuler le comportement d'éléments beaucoup plus grands. Les soudures ont été exécutées sans qu'on ait cherché à obtenir des cordons homogènes; on a ainsi évité que lors de l'application pratique des changements puissent survenir à cause des hétérogénéités géométriques des joints réalisés sur le chantier.

P R O G R A M M E D ' E S S A I

ACIER

On a choisi, pour les essais, des tubes produits couramment au laminoir pèlerin, en acier du type Fe E 36 C3

de l'Euronorm 25. Les tubes de 100 mm de diamètre nominal et de 9 mm d'épaisseur de paroi ont été normalisés. Le tableau 1 donne des renseignements sur la composition et sur les propriétés des tubes employés.

TABLEAU I: Composition chimique et caractéristiques mécaniques de l'acier des tubes.

Acier	Composition chimique (%)					Caractéristiques mécaniques				
	C	P	S	Si	Mn	R (kg/mm ²)	E _{0.2} (kg/mm ²)	A (%)	Z (%)	KV à 0°C (kgm/cm ²)
Fe E 36 C3 Euronorm 25-67	0,20 max	0,050 max	0,050 max	0,55 max	1,50 max	52-62	≥ 36	≥ 20	—	≥ 3,5
Employé	0,20	0,015	0,030	0,36	1,46	61,7	39,9	27	66	4,5

TECHNIQUES DE SOUDAGE

Les joints bout à bout utilisés pendant les essais ont été préparés suivant trois procédés différents, plus particulièrement en ce qui concerne la première passe qui devait déterminer la pénétration correcte, sans reprise à l'envers. Pour une première série d'éprouvettes, celle-ci a été obtenue sur bague support, tandis que pour une deuxième série elle a été réalisée avec des électrodes à enrobage cellulosique. Les passes de remplissage ont toujours été exécutées avec des électrodes à enrobage basique.

Pour avoir un terme de comparaison pratique - tout en tenant compte des travaux des chercheurs anglais (1) et (2), qui permettent d'améliorer la tenue en fatigue de joints tubulaires réalisés avec des bagues spéciales, mais assez coûteuses - on a mis à l'essai un troisième procédé très connu, fréquemment considéré comme celui qui donne une pénétration plus régulière, c'est-à-dire le soudage manuel à arc sous protection d'argon et électrode infusible, désigné aussi par le sigle TIG. Dans ce cas, pour éviter la formation d'amorces de rupture à l'extérieur, on a repassé la surépaisseur à la meule, en essayant de réaliser un raccord très doux entre le cordon et le métal de base à l'extérieur du tube. La fig. 1 montre le profil de la soudure obtenu avec les trois modes opératoires envisagés.

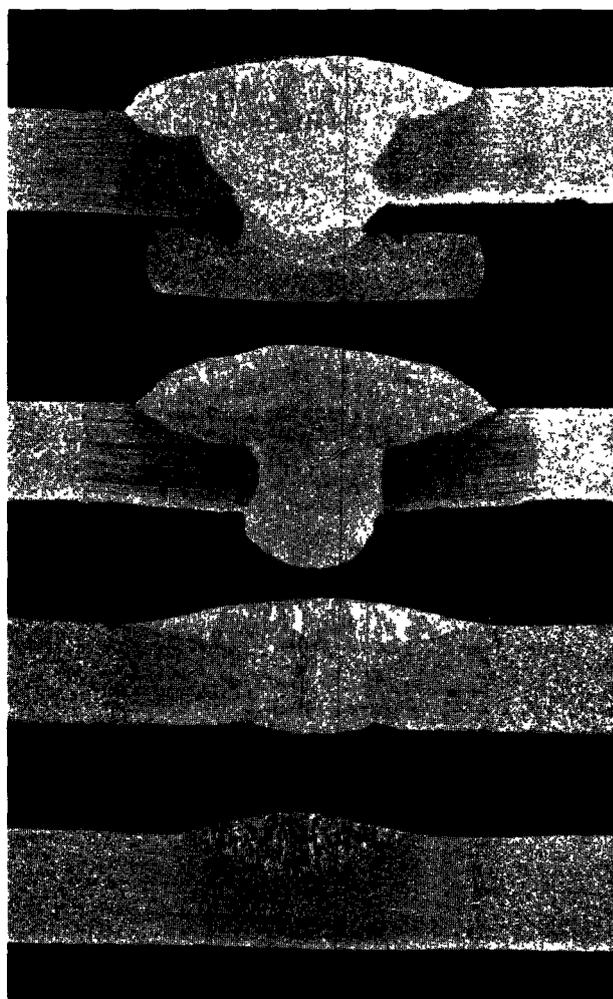


Fig. 1 - Sections transversales des éprouvettes montrant le profil caractéristique des cordons de soudure obtenus avec les divers modes opératoires employés pour la première passe: de haut en bas: bague support; électrode B (enrobage cellulosique); T.I.G.; soudure simulée (sans première passe).

Afin de pouvoir se référer dans tous les cas à une limite supérieure de tenue en fatigue de l'élément à l'essai on a préparé aussi des éprouvettes supplémentaires avec soudure simulée, c'est-à-dire sans première passe. On s'est borné à remplir une rainure circulaire suivant le même mode opératoire que dans le cas TIG.

ESSAIS DE FATIGUE

1) Dispositif d'essai

Tous les essais de fatigue ont été effectués sur un pulsateur Amsler de 50 t à la fréquence de 250 ou de 500 c/mm.

Avant chaque essai et pendant les essais de plus longue durée on a procédé à un étalonnage statique et dynamique au moyen de jauges électriques appliquées à une douille interposée entre la griffe supérieure et l'éprouvette. En plus, vu la dimension de l'éprouvette (v.fig. 2), des jauges ont été fixées près de la soudure sous essai pour vérifier l'axialité de la contrainte.

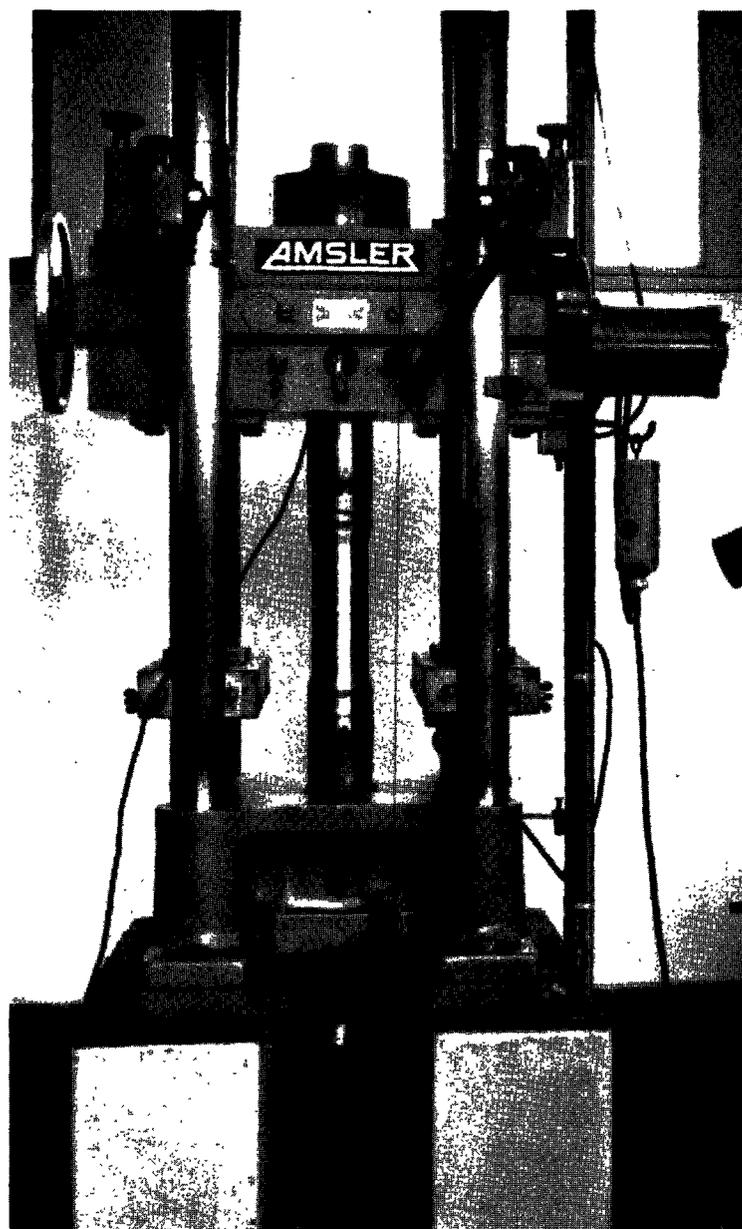


Fig. 2 - Pulsateur AMSLER de 50 t avec éprouvette tubulaire en cours d'essai.

2) Eprouvettes

Le dessin exécutif des éprouvettes est reproduit en fig. 3. Les essais de fatigue à charge axiale sur éprouvettes tubulaires démontrent la tendance à amorcer la rupture à proximité des têtes d'amarrage; cette difficulté a été surmontée en rendant plus étroite la partie centrale du joint en comparaison avec les sections d'extrémité de l'éprouvette. Entre les différentes solutions possibles, on a choisi celle qui consiste à dépouiller au tour, jusqu'à l'épaisseur de paroi nominale de 4,5 mm, la partie de l'éprouvette destinée à la soudure à l'essai, tout en respectant les tolérances d'épaisseur et d'excentricité établies pour le produit. Ce mode opératoire a laissé inaltérées les conditions de la surface intérieure, dont l'effet est sans doute très important pour la résistance à la fatigue.

Les têtes, usinées au tour et filetées d'un côté pour l'amarrage, ont été soudées à roulement avec une première passe en TIG et finition en surface comme déjà décrite pour les cordons TIG à l'essai.

La méthode indiquée ici a permis d'utiliser deux ou trois fois chaque assemblage en éliminant après l'essai la partie des tubes à paroi mince déjà utilisée et en usinant au tour les deux tronçons restants.

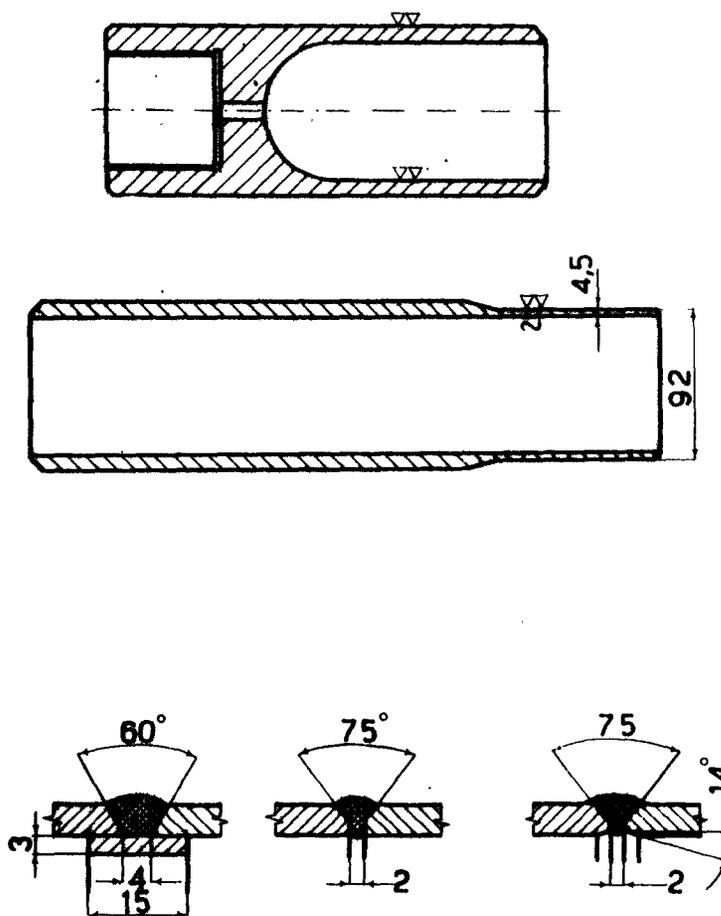


Fig. 3 - Dessin exécutif de l'éprouvette et préparation des bords à souder. En haut: tête d'amarrage. Noter l'alésage à 14° à l'intérieur des tubes soudés en T.I.G. (en bas à droite).

3) Efforts périodiques et choix des niveaux

Les éprouvettes ont été soumises à des efforts axiaux de traction ondulée, avec des rapports entre les contraintes minimum (σ_{\min}) et maximum (σ_{\max}) $R \approx 0$ et $R = 0,4$. Dans le premier cas, la contrainte minimum appliquée sur l'éprouvette était constante et fixée à 1 kg/mm^2 . Dans la ré-

gion de la pente de la courbe de Wöhler on a fixé, pour l'un et l'autre cas, trois niveaux équidistants appropriés, toujours les mêmes pour chaque série d'éprouvettes.

Pour vérifier les valeurs des limites d'endurance, établies suivant l'usage à 2 millions de cycles, on a fait varier la contrainte avec un écart entre deux niveaux successifs de 1 Kg/mm^2 .

4) Exploitation statistique

La conception du programme prévoyait l'exploitation statistique des données, afin de tirer le plus grand volume possible d'informations des résultats des essais, qui, en raison du prix de revient élevé, devaient être limités au maximum.

Dans la région de la pente de la courbe de Wöhler on s'est borné à réaliser des essais sur trois éprouvettes pour chaque niveau: la constance des niveaux pour les trois séries d'éprouvettes et le fait que la succession des essais était établie par le hasard, ont permis de tirer des informations supplémentaires plus générales de l'ensemble des données.

Pour la détermination de la limite d'endurance, on envisageait d'utiliser la méthode statistique dite de l'escalier; cependant les résultats des premiers essais ont montré qu'il y avait certaines difficultés lors de la classification des éprouvettes en "rompues" et "non rompues".

Pour cette raison, tout en maintenant le programme établi, on a renoncé au calcul de la limite avec l'écart type, adoptant la méthode plus simple qui consiste à choisir comme limite le niveau de contrainte auquel on n'a trouvé aucune rupture.

EXECUTION DES SOUDURES

Un soin particulier a été donné au soudage des éprouvettes. Les soudures ont été effectuées par l'usine spécialisée en applications tubulaires. On a évité de se servir d'un soudeur particulièrement spécialisé; au contraire on a laissé travailler l'atelier selon ses possibilités, en se bornant à réceptionner les cordons de soudure sur la base d'un cahier de spécifications bien détaillées.

Les éprouvettes ont été soudées sans préchauffage en axe horizontal fixe, en utilisant les matériaux d'apport indiqués dans le tableau 2.

TABLEAU II: Matériaux d'apport utilisés.

Repère	Diamètre (mm)	Enrobage	Classification ISO
Electrode A	2,5	Basique	E 445 B16
Electrode B	2,5	Cellulosique	E 433 C16
Fil (0,5 Mo) C	2,5	—	—

Les bords à souder étaient préparés selon le type de la première passe, comme indiqué dans la figure 3 (tolérances normales pour l'atelier - v. Normes UNI 4633-60). L'alignement des tronçons soudés a été rigoureusement maintenu dans des limites étroites; on le mesurait en faisant rouler l'éprouvette finie sur des appuis: la partie centrale ne devait pas s'écarter de plus de 2.8% de la distance entre les têtes d'amarrage.

Les éprouvettes étaient soudées au fur et à mesure qu'on effectuait les essais, avec une succession établie au hasard; on peut dire que la qualité des soudures représente un échantillon moyen de la production normale d'une usine.

La présence de défauts a été tolérée pour ce qui concerne les irrégularités sur les surfaces du cordon; cela donne lieu naturellement à des imperfections du profil. De tout petits défauts ont été admis également à l'intérieur du cordon; les spécifications adoptées pour l'un et l'autre cas sont indiquées au tableau 3. On peut remarquer que pour le cas du TIG, qui devait servir comme terme de comparaison, on a exclu totalement les cas de manque de pénétration, les caniveaux et les retassures.

Dans tous les cas on a exclu n'importe quel groupement de défauts. On a toutefois accepté la possibilité de faire des réparations, puisque cela se fait également dans la pratique. Ainsi l'on a fait jouer tous les facteurs qui ont un rôle pratique, afin de parvenir à une mesure statistique de la dispersion des données à l'échelle de l'emploi.

TABLEAU III: Critères d'acceptation des défauts.

Défauts	Longueur, diamètre ou surface maximale tolérée pour chaque défaut visible en radiographie		Distance minimale admissible entre deux défauts. Z = total des dimensions des deux défauts		Quantité globale des défauts tolérés	
	a) bague support. b) 1 ^{re} passe avec élect. cellulos.	c) 1 ^{re} passe en TIG.	a) bague support. b) 1 ^{re} passe avec élect. cellulos.	c) 1 ^{re} passe en TIG.	a) bague support. b) 1 ^{re} passe avec élect. cellulos.	c) 1 ^{re} passe en TIG.
Allongés						
Manque de pénétration ..	2,5 mm	—	—	—	1	—
Soufflures vermiculaires ..	2,3 mm		—		1	
De forme quelconque						
Inclusions de laitier ou d'oxyde	1 mm		—		1	
Soufflures	1,5 mm		—		1	
Inclusions de tungstène ..	1,5 mm		—		1	
A nids						
Nids de soufflures	81 mm ² (longueur max. 9 mm)		4 Z		81 mm ²	
De profil						
Caniveaux et morsures	7 mm	—	4 Z	—	18 mm	—
Caniveaux à la racine	4,5 mm		2 Z		7 mm	
Excès de pénétration	∅ 5 mm		18 mm		5 mm	
Retassures à la racine ou mauvaise reprise	7 mm ²	—	—	—	1	—

R E S U L T A T S

Au total on a fait des essais sur 186 éprouvettes, dont 12 essais préliminaires pour fixer les niveaux de sollicitation à examiner, 72 dans la région de la pente des courbes de Wöhler et 102 pour établir la limite d'endurance et en analyser la signification. Parmi ces dernières éprouvettes une dizaine ont été portées jusqu'à 4, 6 ou 10 millions de cycles. Les résultats sont reportés sur six différentes courbes de Wöhler (Fig. 4 à 9), une pour chaque groupe d'essais.

Les ruptures par fatigue se sont amorcées dans un des angles de raccordement entre soudure et métal de base, presque toujours du côté du cordon de pénétration. La fig. 10 en montre des cas typiques. On n'a cependant pas trouvé d'amorces à partir d'un défaut situé à l'intérieur du cordon.

Pour ce qui concerne les défauts du profil du cordon, ce n'est pas toujours la région du plus mauvais raccord qui a déterminé l'amorce de la cassure (v.fig. 11). En effet, plusieurs facteurs peuvent déterminer l'endommagement qui précède la rupture: ainsi la concomitance d'une faible épaisseur de paroi avec le point où se vérifie le plus mauvais alignement admis par les tolérances fixées, peut engendrer une concentration d'efforts supérieure à celle qui est provoquée par un mauvais raccord. On doit aussi noter que dans beaucoup de cas la fracture s'est

amorcée en même temps en plusieurs endroits du joint, aussi bien d'un côté que de l'autre du cordon.

Une situation inattendue s'est vérifiée dans la région de l'endurance. En effet, pour des joints tubulaires, il ne semble pas juste - comme on le fait fréquemment pour les petites éprouvettes - de considérer comme non rompues toutes les éprouvettes qui sont parvenues à 2 millions de cycles sans rupture complète. Pour les joints tubulaires se pose le problème de décider si l'éprouvette non rompue à un nombre donné de cycles est endommagée ou complètement indemne.

Dès le début du présent travail, les éprouvettes qui avaient atteint 2 millions de cycles furent soumises aux essais non destructifs à l'extérieur et, après découpage, à l'intérieur également. On a ainsi constaté qu'un certain nombre d'éprouvettes apparemment non rompues n'étaient pas complètement indemnes, mais présentaient un certain degré d'endommagement, indiqué par la présence de petites fissures à peine amorcées, mais non propagées au point d'être aperçues à l'extérieur pendant l'essai.

On a enfin soumis à un essai destructif chaque éprouvette découpée en bandes, pour subdiviser ensuite les éprouvettes apparemment non rompues à 2 millions de cycles en trois groupes. Le premier comprenait les éprouvettes sans aucune fissure. Le deuxième groupe - très petit - était formé par les éprouvettes avec fissures amorcées à l'intérieur du joint et propagées déjà jusqu'à l'ex-

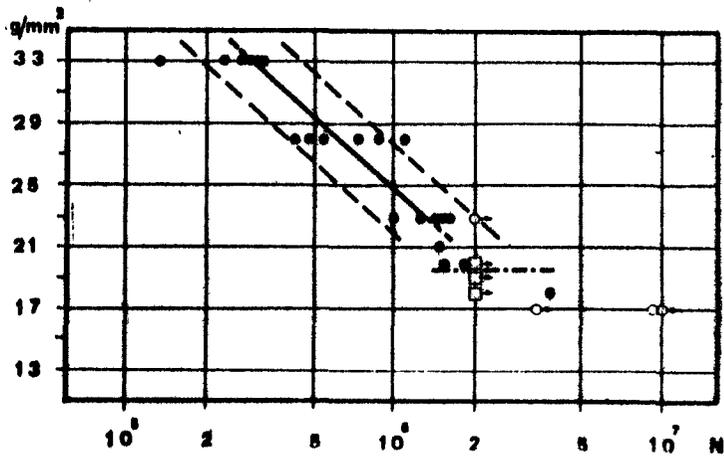


Fig. 4 - Résultats des essais de fatigue conduits sur éprouvettes soudées sur bague support, avec rapport de sollicitation $R = 0,4$. Les points noirs représentent les éprouvettes rompues, les cercles blancs les éprouvettes non rompues. Les petits carrés indiquent des groupes de deux ou plusieurs éprouvettes (noir ou blanc suivant le résultat). Les lignes discontinues représentent les limites de confiance à 80% des valeurs individuelles, c'est-à-dire les probabilités de rupture de 10% et 90%.

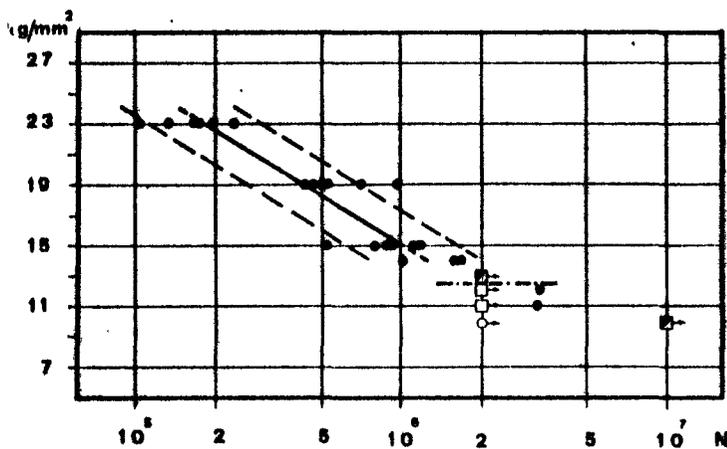


Fig. 5 - Résultats des essais conduits sur éprouvettes soudées sur bague support, avec rapport de sollicitation $R = 0$.

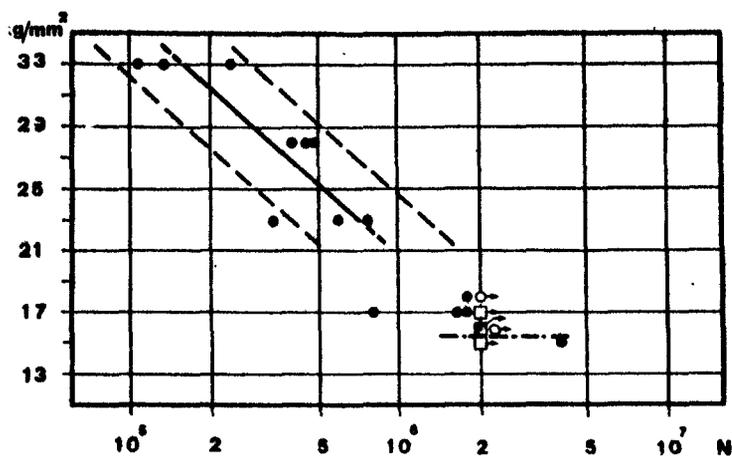


Fig. 6 - Résultats des essais conduits sur éprouvettes dont la première passe a été soudée avec une électrode à enrobage cellulosique. Rapport de sollicitation $R = 0,4$.

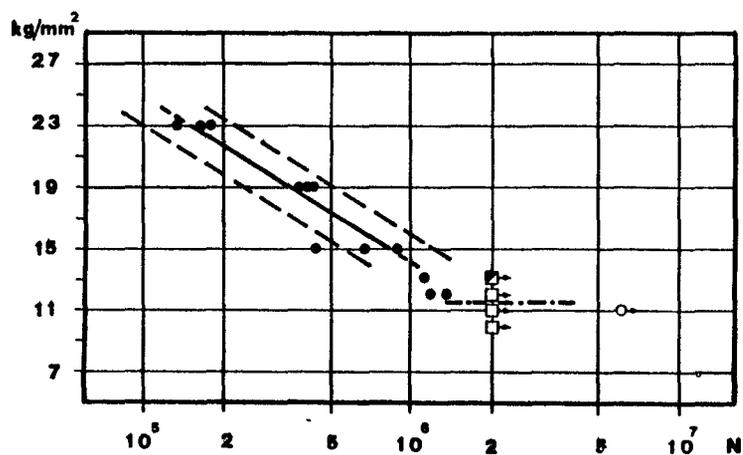


Fig 7 - Résultats des essais conduits sur éprouvettes dont la première passe a été soudée avec une électrode cellulosique. Rapport de sollicitation $R = 0$.

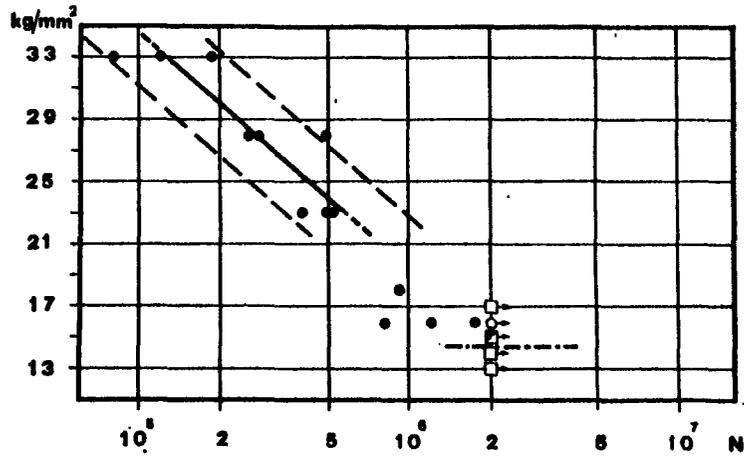


Fig. 8 - Résultats des essais conduits sur éprouvettes dont la première passe a été soudée en T.I.G. - Rapport de sollicitation $R = 0,4$.

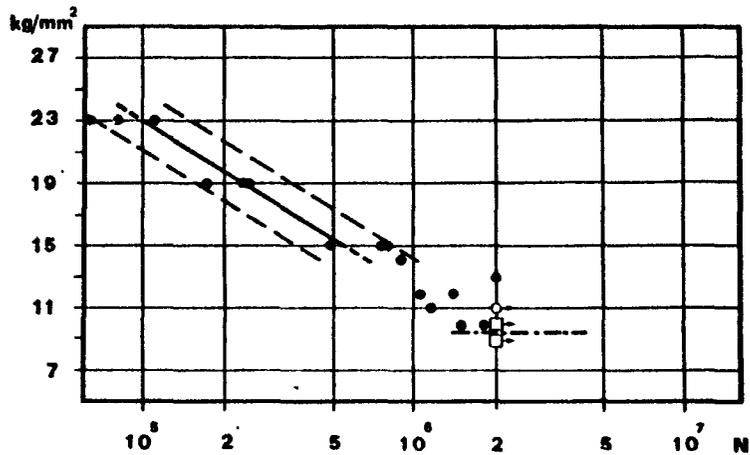


Fig. 9 - Résultats des essais conduits sur éprouvettes dont la première passe a été soudée en T.I.G. - Rapport de sollicitation $R = 0$.



Fig. 10 - Fissure de fatigue d'une éprouvette pour les trois modes opératoires étudiés (macro x2, transversale au cordon dans le point d'amorce).

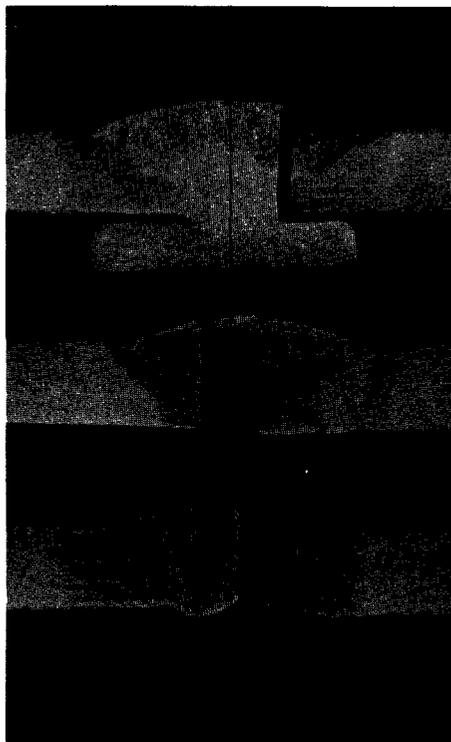


Fig. 11 - Types de fissure de fatigue moins fréquemment vérifiés (macro x2, transversale au cordon dans un des points d'amorce).

térieur (v.fig. 12). Les éprouvettes de ce groupe ont été considérées comme rompues. Le troisième groupe, enfin, comprenait les éprouvettes non complètement indemnes, puis-



Fig. 12 - Fissure localisée relevée à la suite d'essais destructifs sur éprouvette apparemment non rompue à 2 millions de cycles. L'amorce intérieure s'est propagée jusqu'à la surface extérieure du tube.

que une ou plusieurs petites fissures s'étaient amorcées à l'intérieur sans toutefois se propager jusqu'à la surface extérieure du tube (v.fig. 13 et 14). Si l'on considère les éprouvettes de ce dernier groupe comme non rompues, les résultats obtenus dans la zone de l'endurance donnent le cadre représenté au tableau 4. Sur 64 éprouvettes considérées comme non rompues, 30 ont montré quelques petites fissures déjà amorcées à l'intérieur du joint,

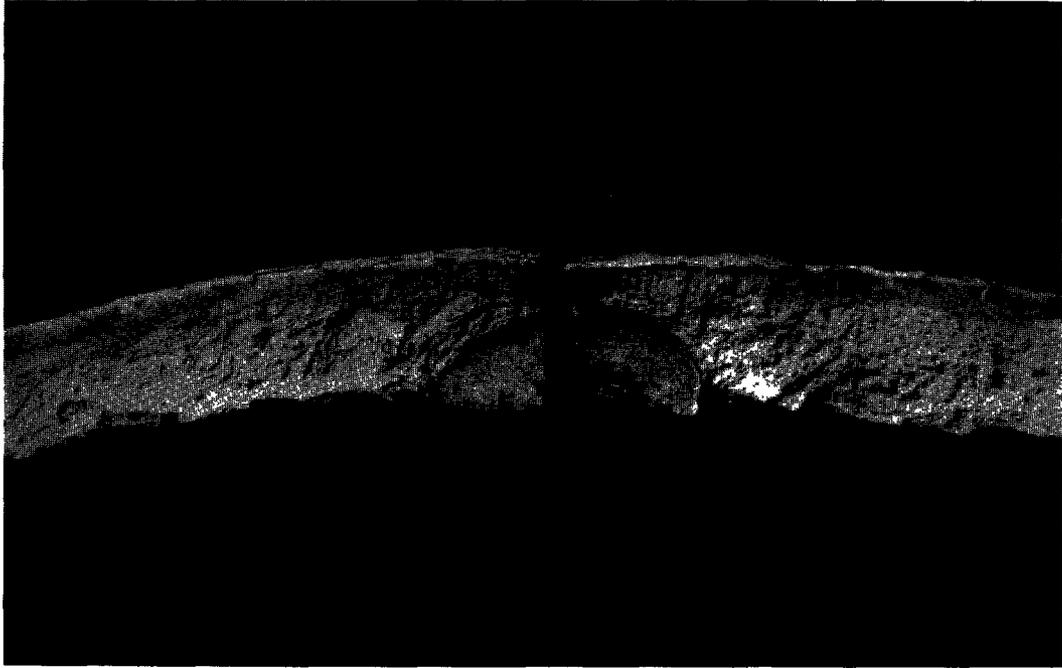


Fig. 13 - Autre cas d'éprouvette endommagée (v.fig. 12).
Petite amorce intérieure non encore propagée.



Fig. 14 - Autre cas d'éprouvette endommagée (v.fig. 12).
L'amorce intérieure s'est propagée, mais n'a
pas atteint la surface extérieure.

TABLEAU IV: Nombre d'éprouvettes essayées dans la région de la limite d'endurance.

	Première passe											
	Avec bague support				Avec électrode B				Procédé TIG			
	σ kg/mm ²	R(*)	N.R.(*)	Total	σ kg/mm ²	R(*)	N.R.(*)	Total	σ kg/mm ²	R(*)	N.R.(*)	Total
R = 0,4	21	1	—	1								
	20	2	2	4								
	19	—	4	4								
	18	—	3	3	18	1	1	2	18	1	—	1
	17	—	3	3	17	3	2	5	17	—	2	2
				15	16	1	3	4	16	3	1	4
					15	—	3	3	15	2	2	4
								14	14	—	3	3
									13	—	2	2
												16
R = 0	14	3	—	3					14	1	—	1
	13	2	5	7	13	2	1	3	13	1	—	1
	12	—	5	5	12	2	3	5	12	2	—	2
	11	—	6	6	11	—	3	3	11	1	1	2
	10	—	3	3	10	—	2	2	10	2	2	4
				24				13	9	—	2	2
												12

(*) R = Rompues - N.R. = Non rompues.

et sur 30 éprouvettes considérées comme rompues, 5 apparaissaient non rompues, mais avaient une fissure propagée jusqu'à l'extérieur.

EXPLOITATION STATISTIQUE DES RÉSULTATS

REGION DE L'ENDURANCE

Pour les raisons exposées auparavant, dans la région de l'endurance on a préféré renoncer à l'application de méthodes statistiques, qui, comme il a été démontré par A. PALAZZI (4), ont d'ailleurs une sensibilité très faible, qui s'annule presque entièrement dans le cas de petits échantillons. Seulement l'application intégrale de la méthode dite de l'escalier avec une trentaine de données aurait permis une estimation de l'écart-type, qui, dans tous les cas, pouvait être plutôt élevé.

Les indications du tableau 4 ne donnent aucun renseignement sur la probabilité de rupture, mais on peut également affirmer que les limites d'endurance indiquées ont un bon degré de fiabilité pour les constructions pratiques; en effet, il arrive très rarement que le nombre des cycles effectivement appliqués pendant leur vie soit aussi élevé.

DUREE DE VIE AUX CONTRAINTES ELEVEES

L'exploitation statistique des données a permis d'éclaircir beaucoup de questions dans la région de la pente des courbes de Wöhler. Dans ce domaine, l'utilisation de petits échantillons a démontré toute son efficacité en ce qui concerne l'élaboration des informations mises à disposition par l'expérience.

Tous les calculs ont été effectués sur les logarithmes des durées de vie. On s'est assuré en premier lieu qu'aucun biais ne se soit infiltré pendant l'exécution du programme, qui durait deux ans. Pour cela, on a comparé les données obtenues pendant une première période à 250 cycles/mi-
nute avec les données successives, résultant d'essais conduits à 500 c/mn. On a aussi essayé de savoir s'il y avait quelque différence entre les groupes d'essais exécutés sur des éprouvettes préparées avec des manchons nouveaux et celles préparées en réutilisant les manchons qui avaient déjà été soumis à des essais. Enfin on a comparé les résultats obtenus sur les seules éprouvettes soudées sur bague support, pour voir s'il y avait quelque différence entre les deux groupes de données, obtenues en répétant successivement l'essai sur le type de soudage qui avait montré le meilleur comportement.

Dans tous ces cas on n'a eu aucune indication de différence au niveau de probabilité de 5 pour cent.

Le but de l'exploitation des résultats consistait dans

l'examen séparé de chaque courbe de Wöhler, mais surtout dans le regroupement de toutes les données obtenues (72), pour accomplir une analyse de la covariance ¹⁾, après qu'on s'était aperçu par les tests de Partlett et de Cochran, qu'il n'y avait pas de différences entre les variances de groupes singuliers de données. On a aussi vérifié le degré de normalité de la distribution analysée: vu que les données considérées dans chaque courbe de Wöhler suivent une loi linéaire (fig. 4 à 9) à une seule exception près, on a accumulé les déviations des logarithmes des durées de vie, prises à partir des droites de régression, et l'on a pu constater ainsi la validité de l'hypothèse.

Les résultats pratiques tirés de l'analyse de la covariance sont discutés en détail dans le chapitre suivant. Il paraît intéressant de rapporter ici l'estimation de la variance résiduelle globale de l'expérience:

$$v^2 = 0,0205$$

1) L'application de cette méthode aux données des essais de fatigue a été tout récemment utilisée aussi par H.S. REEMSNYDER (5). Pour les autres tests statistiques appliqués ici, on renvoie aux nombreux ouvrages publiés sur le sujet, dont on cite à titre d'exemple BENNET et FRANKLIN (6) et SNEDECOR (7).

Cette valeur, obtenue en opérant sur les durées de vie transformées en logarithmes, permet de calculer l'écart-type des données individuelles; il résulte:

$$s = 0,143$$

Si on transforme cette donnée en passant par l'anti-logarithme, la mesure de la dispersion des valeurs individuelles des durées de vie s'avère approximativement de 39%.

On peut également utiliser cette estimation pour indiquer la validité de la position de la ligne de régression $\sigma/\log N$ avec ses limites de confiance; le tableau 5 donne ces limites, transformées en durées de vie, pour les niveaux de contrainte intermédiaires. La bande de confiance trouvée pour le groupe des données obtenues pour les joints avec première passe sur bague support est plus étroite, parce que, dans ce cas, on dispose d'un nombre plus grand de données.

TABLEAU V: Limites de confiance à 95 % obtenues pour la position centrale des droites de régression sur les diagrammes de Wöhler (nombre de cycles).

Première passe	R = 0; $\sigma_{max} = 19 \text{ kg/mm}^2$		R = 0,4; $\sigma_{max} = 28 \text{ kg/mm}^2$	
	inf.	sup.	inf.	sup.
Sur bague support	378 000	509 000	539 000	725 000
Avec électrode B	282 000	433 000	272 000	418 000
Procédé TIG	186 000	286 000	219 000	337 000

La validité de ces limites s'affaiblit au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la partie centrale du champ de contraintes exploré; toutefois l'ensemble des informations ainsi obtenues donne lieu à des conclusions beaucoup plus utiles que celles qu'on pouvait tirer des données groupées séparément dans les diagrammes de Wöhler.

En ce qui concerne les pentes des droites de régression obtenues, on a constaté - toujours à l'aide de l'analyse de la covariance - que la résistance à la fatigue des joints réalisés selon les trois modes opératoires suit une même loi, c'est-à-dire que la régression $\sigma/\log N$ a la même pente dans les trois cas. Il y a par contre une différence significative (de 1%) entre les essais conduits avec un rapport de sollicitation $R = 0$ et $R = 0,4$ (v.fig. 15, en haut). Cela se produit lorsque l'on considère le diagramme de Wöhler en coordonnées $\sigma/\log N$, comme nous l'avons fait jusqu'ici, puisque le projet était basé sur l'hypothèse d'une influence linéaire de la contrainte sur la durée de vie. Cette hypothèse est donc à rejeter. Si l'on refait les calculs en introduisant au lieu de σ son logarithme, c'est-à-dire si utilise les coordonnées $\log \sigma/\log N$ pour le diagramme de Wöhler, la différence relevée disparaît complètement (v.fig. 15 en bas). Ce fait est en bon accord avec la relation proposée par le "Committee Fatigue Testing" du Welding Research Council des Etats Unis (8) pour les soudures en bout; la valeur de k est, dans notre cas, légèrement différente (0,24), et cela dépend de l'approche suivie pour le calcul de la régression. En conclusion, on peut af-

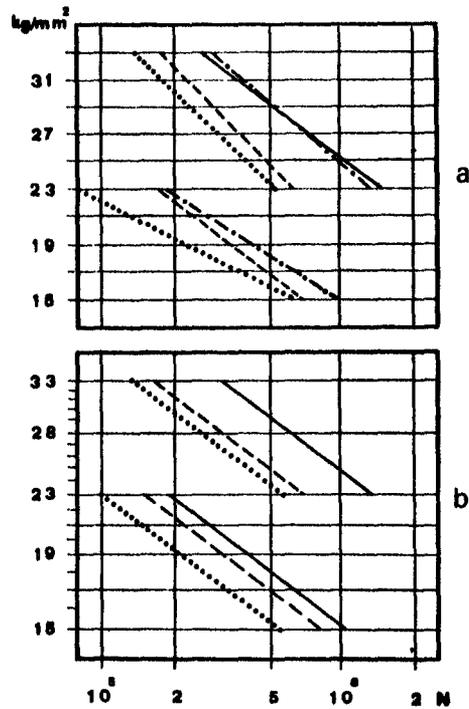


Fig. 15 - Comparaison entre les droites de régression sur diagramme de Wöhler.

ligne continue: soudage sur bague support

ligne discontinue: soudage avec électrode B

ligne pointillée: soudage en T.I.G.

En haut: -régression $\sigma/\log N$; les droites à traits et points alternatifs sont tracées avec la pente calculée d'après l'analyse globale, les autres se réfèrent aux groupes séparés de données.

En bas: -régression $\log \sigma/\log N$, droites calculées avec pente uniforme.

firmer que l'application des méthodes statistiques en fatigue est d'une très grande utilité quand on peut l'envisager avant l'exécution des essais: cette méthode apparaît nettement plus indiquée dans la région de la pente des courbes de Wöhler que dans la région de l'endurance.

D I S C U S S I O N D E S R E S U L T A T S D E S E S S A I S D E F A T I G U E

LIMITES D'ENDURANCE

Comme il a déjà été montré auparavant, de nombreuses éprouvettes sont arrivées à la limite conventionnelle de 2 millions de cycles, n'étant pas rompues en apparence seulement.

En dépit de cela on a décidé de poursuivre au delà de cette limite un certain nombre d'essais, à savoir 8 pour les joints soudés sur bague support (fig. 4 et 5) et 2 pour les éprouvettes réalisées avec électrode cellulosique (fig. 6 et 7). Ces essais ont été conduits à une sollicitation égale ou inférieure à celle indiquée comme limite d'endurance.

Etant donné que sur 32 éprouvettes non rompues à la limite d'endurance ou à 1 ou 2 Kg/mm² en-dessous, de celle-

ci, 15 présentaient de petites fissures non propagées jusqu'à l'extérieur, on peut considérer qu'il y a une probabilité de 50% environ pour que chaque éprouvette portée au-delà des 2 millions de cycles soit déjà endommagée. Il faut souligner le fait que les premières cassures ne sont survenues qu'à 3.5 millions de cycles. Ce fait augmente notablement la validité des données présentées dans le tableau 4 et déjà discutées à la pag. 23.

TABLEAU VI: Limites d'endurance (probabilité de rupture de 50%) calculées par extrapolation des droites de régression pour N = 2 millions de cycles, en comparaison des limites du tableau IV (kg/mm²).

Première passe	R = 0		R = 0,4	
	Données		Données	
	calculées	obtenues	calculées	obtenues
Avec bague-support	12,9	12	20,8	19
Avec électrode B	12,2	11	17,9	15
Avec procédé TIG	11,0	9	17,0	14

Une confirmation ultérieure des limites obtenues expérimentalement peut être dérivée par extrapolation des droites calculées, suivant la formule mentionnée (8):

$$S = \frac{B}{N^k}$$

ou en logarithmes: $\log S = B' - k \log N$
dans lequel S est la tension maximum qui produit la rupture après N pulsations.

Pour $N = 2.000.000$ et les paramètres B' et k obtenus précédemment, on a calculé les valeurs reportées au tableau 6 en comparaison avec les données directement déterminées. On constate un accord, satisfaisant, cela d'autant plus que les données calculées se réfèrent à la probabilité de rupture de 50%.

Il peut être enfin intéressant de considérer les rapports des limites d'endurance constatées avec la contrainte admise pour le calcul statique. Si l'on se réfère à la valeur de 24 Kg/mm^2 (c'est-à-dire à deux tiers de la limite d'élasticité de l'acier utilisé), on obtient les données du tableau 7.

TABLEAU VII: Rapports entre la limite d'endurance et la contrainte admise pour le calcul statique.

Première passe	R = 0	R = 0,4
Sur bague-support	0,500	0,792
Avec électrode B	0,458	0,625
Par procédé TIG	0,375	0,584

INFLUENCE DE LA PREMIERE PASSE

Les essais réalisés dans le cadre du présent travail se référant à des soudures de qualité courante, effectuées dans toutes les positions, on a pu démontrer une fois de plus l'influence déterminante de la forme du cordon de pénétration sur le comportement à la fatigue des joints en bout sans reprise à l'envers.

Les résultats obtenus sur les éprouvettes avec première passe simulée ont confirmé le fait qu'avec un profil du cordon presque parfait (fig. 1, en bas) les joints peuvent atteindre une limite d'endurance comparable à la contrainte admise pour le calcul statique: les éprouvettes ont dépassé 2 millions de cycles avec une contrainte de 25 Kg/mm^2 (R=0), alors qu'aux sollicitations supérieures des ruptures se sont vérifiées loin de la soudure.

On peut donc affirmer que les facteurs métallurgiques de la soudure et les contraintes résiduelles n'exercent pas d'influence notable sur le comportement des joints en fatigue lorsqu'on est en présence d'irrégularités de profil. Il s'est avéré que parmi ces irrégularités, les plus graves étaient les excès de pénétration.

Les mauvais résultats obtenus sur les soudures effectuées avec la première passe en T.I.G. peuvent être plutôt inattendus non seulement par rapport au meilleur comportement de la bague support, mais aussi à celui de l'électrode cellulosique ¹⁾, dont on a constaté que la pénétration était effectivement plus élevée.

Ce comportement peut être expliqué par plusieurs facteurs. Premièrement, on doit tenir compte du fait que l'alésage, effectué à l'intérieur du chanfrein pour régulariser la pénétration en première passe, peut avoir introduit un affaiblissement de la paroi ou un accroissement de l'effet d'entaille. Deuxièmement, on doit se rappeler que le soudage a été effectué en axe fixe, et, dans cette condition opératoire, il est assez difficile de contrôler la pénétration lors de la fermeture finale.

1) Les différences trouvées au moyen de l'analyse de la covariance ont été significatives à 1%.

Il peut y avoir eu un effet de réchauffement des zones d'amorce des fissures aux niveaux de contraintes les plus élevés. Malheureusement un pareil effet n'a pas pu être mis en évidence, puisque la rupture s'amorçait à l'intérieur du joint. D'ailleurs les essais effectués avec $R = 0,4$ n'ont donné aucune indication de ce genre. Les résultats obtenus par l'analyse de la covariance ont démontré qu'il n'y avait aucune différence entre les pentes des droites de régression, c'est-à-dire que ce cas ne s'est pas distingué des autres au point de vue de la composante linéaire. Enfin, l'analyse des distributions des données autour des droites susdites n'a indiqué aucune tendance générale des données à dévier de la forme rectiligne. On n'a donc pas trouvé d'indications suffisamment précises, pour justifier la recherche d'une interprétation phénoménologique du résultat particulier indiqué à la fig. 16.

C O N C L U S I O N S

Les essais de fatigue décrits dans le présent travail ont donné un ensemble de résultats suffisants pour établir le niveau des sollicitations admissibles dans tous les cas

où se pose le problème de l'utilisation des tubes soudés bout à bout soumis à des contraintes axiales ondulées.

Les résultats obtenus comblent un vide qui existait dans le domaine de l'emploi en fatigue des structures tubulaires pour des constructions de fortes dimensions et de grande importance, pour lesquelles il est impossible d'utiliser de très grosses brides.

L'échelle des éprouvettes utilisées est en effet suffisamment grande pour qu'on puisse les considérer en vraie grandeur dans un élément de construction de treillis tubulaires, mais également représentative pour les tubes de diamètre plus grand, sans qu'il y ait des incertitudes à cause de changements de comportement dus aux hétérogénéités des joints réalisés en pratique. En effet on a choisi pour souder les éprouvettes le même mode opératoire qu'on utilise normalement sur le chantier.

R e m e r c i e m e n t s

Les auteurs désirent remercier les experts des six Pays de la Communauté Européenne du Charbon et de l'Acier pour leur coopération scientifique: ils remercient en particulier M. GUERRERA, Vice-Président de l' "Istituto Italiano della Saldatura" pour sa grande expérience et l'aide infatigable mises à leur disposition pendant toutes les phases du travail.

B I B L I O G R A P H I E

- (1) LISTER E. - WOODWARD D.H.: "The Use of Welding in Tubular Structures", British Welding Journal, septembre 1964, p. 434-441
- (2) DAWES M.G.: "Fatigue Strength of Tubes Butt Welded Using a Ceramic Coated Backing Member", B.W.R.A. Report, British Welding Journal, juin 1967, p. 304-312
- (3) FREUDENTHAL A.M.: "Remarques sur le dommage cumulé en matière d'essai de fatigue et de tracé des structures exposées à la fatigue", Doc. IIS-311-68 (ex doc. XIII-456-67), Soudage et techniques connexes, mai/juin 1969, p. 254-259
- (4) PALAZZI A.: "Interprétation statistique des résultats d'essai de fatigue", Mémoires Scientifiques Rév. Metallurg., LVI, n. 4, septembre 1959, P. 403-418
- (5) REEMSNYDER H.S.: "Some Significant Parameters in the Fatigue Properties of Weld Joints", Welding Journal, n. 5, mai 1969, Research Suppl. p. 213s + 220s.
- (6) BENNET C.A. - FRANKLIN N.L.: "Statistical Analysis in Chemistry and the Chemical Industry", Ed. John Wiley & Sons, New York, 1967.
- (7) SNEDECOR G.W.: "Statistical Methods", Ed. I.S.C.P. Iowa, 1956
- (8) SOETE W. - VAN CROMBRUGGE R.: "Etude de la résistance à la fatigue des assemblages soudés", Recherche de l'I.B.N. (ausp. I.R.S.I.A.), publ. sur la "Revue de la Soudure" 1951.

