

Comparaison de plusieurs méthodes de parachèvement sur le comportement en fatigue de pièces types (*)

A. ANDRZEJEWSKI et M. BRAMAT (Institut de Soudure)
J.F. FLAVENOT (CETIM)

Les résultats qui sont présentés ci-après ont été obtenus à l'occasion de travaux menés à l'Institut de Soudure et au CETIM, dans le cadre d'une étude financée par le CETIM (Commission Soudage).

I. INTRODUCTION

La durée de vie en fatigue d'une éprouvette ou d'une structure comporte 3 phases :

- amorçage d'une fissure macroscopique,
- propagation jusqu'à une taille critique,
- rupture finale lorsque la contrainte appliquée dépasse la résistance résiduelle.

La plus grande partie de la durée de vie correspond aux 2 premières phases, la durée de la phase initiale dépendant des caractéristiques du matériau, toutes conditions égales d'ailleurs. De ce fait, la phase d'amorçage, qui est prépondérante, est proportionnelle aux caractéristiques du matériau. S'il existe une entaille douce, l'endurance varie toujours en fonction de la résistance mais sans suivre une loi linéaire (inflexion vers les valeurs élevées de la résistance) (fig. 1).

Pour les joints soudés, il est bien connu que l'endurance n'est pas fonction des caractéristiques du matériau.

Les joints soudés se comportent comme des éprouvettes à entailles aiguës. Il ne faut pas chercher une explication à ce comportement dans la géométrie du pied de cordon qui apporte une concentration de contraintes faible mais plutôt dans la présence de défauts inhérents au procédé de soudage, semblables à des fissures, préexistants au pied du cordon. Le fait que ces défauts existent, et que la vitesse de fissuration soit indépendante des caractéristiques du matériau expliquent :

- la faible résistance des joints soudés à la fatigue,
- la quasi-indépendance vis-à-vis des caractéristiques mécaniques du matériau.

Les joints soudés présentent également une autre caractéristique qui influence fortement leur comportement en fatigue : il s'agit de la présence de contraintes résiduelles, présentes dans les structures et éprouvettes de grandes dimensions, et qui atteignent la limite d'élasticité du métal de base ou du métal déposé.

Les contraintes externes (engendrées par la charge appliquée) se superposent aux contraintes résiduelles. La vie en fatigue est donc a priori indépendante de la contrainte moyenne appliquée car la contrainte locale effective maximale est égale à la limite d'élasticité.

La contrainte minimale s'en déduit par soustraction de l'étendue des contraintes appliquées. On note ainsi que les contraintes de compression sont aussi néfastes que les contraintes de traction, ce qui est très différent du cas des pièces non soudées.

De ce qui précède, on peut dégager 2 principes pour améliorer la résistance en fatigue :

- réintroduction d'une phase d'amorçage par modification de la forme de l'entaille et élimination des défauts aigus,
- modification du champ de contraintes locales par relaxation de contraintes ou établissement de contraintes résiduelles bénéfiques.

Le but de cette étude procède plutôt de la seconde approche puisque les méthodes de parachèvement suivantes ont été comparées :

- détensionnement par traitement thermique,
- précharge statique,
- grenailage de précontrainte,
- martelage,
- combinaison : détensionnement + grenailage.

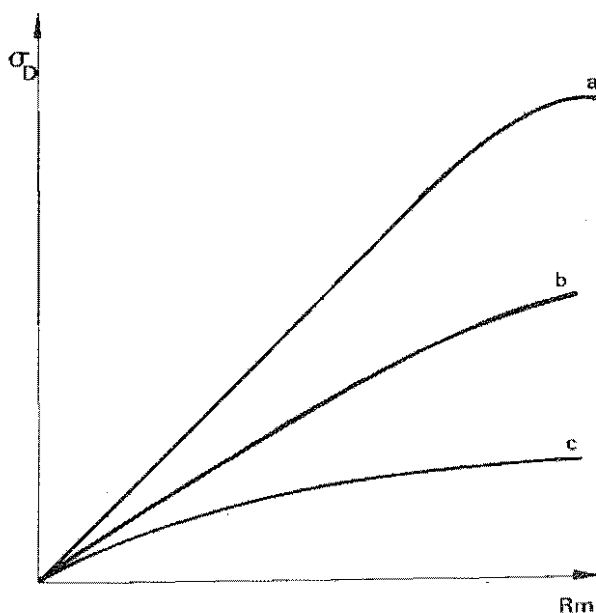


Fig. 1 — Evolution de l'endurance en fonction de R_m pour différentes structures.

- a : éprouvette homogène sans entaille $K_t \approx 1$,
- b : éprouvette avec entaille de faible acuité,
- c : éprouvette entaillée, joints soudés.

(*) Communication présentée le 19 avril 1984 à la Société des Ingénieurs Soudeurs à Paris.

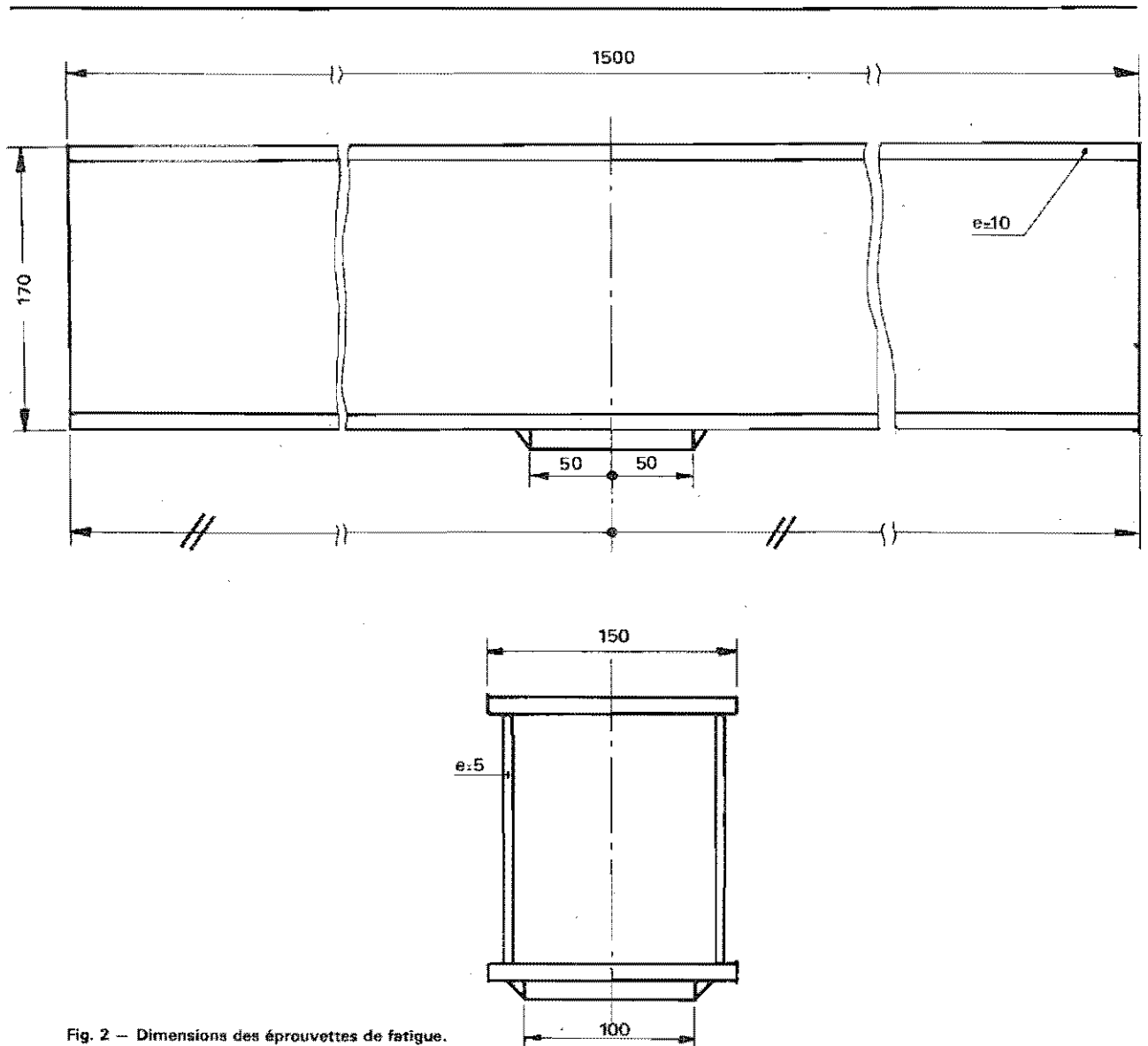


Fig. 2 – Dimensions des éprouvettes de fatigue.

L'efficacité des méthodes a été testée sur une poutre-caisson reconstituée par soudage qui comporte un appendice soudé non porteur qui peut être assimilé à un assemblage de type K_2 .

L'amorçage des fissures de fatigue est normalement attendu en pied de cordon.

II. DÉFINITION DES ÉPROUVETTES

Il s'agit d'éprouvettes en forme de caisson constituées par soudage de deux âmes verticales, épaisseur 5 mm sur deux semelles, épaisseur 10 mm (fig. 2).

Le soudage du caisson a été réalisé par procédé MAG sans préchauffage. Les éprouvettes ont été soudées à plat après bridage des tôles. L'appendice soudé sur l'une des semelles a une épaisseur de 10 mm. Il a été soudé sans préchauffage, par soudage à l'arc avec électrodes enrobées de type basique.

L'acier utilisé est un E 36 d'après la norme NF A 35-205 ; les caractéristiques mécaniques de l'acier utilisé sont détaillées dans la tableau I.

TABLEAU I – CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DE L'ACIER E 36

Caractéristiques	Rm (MPa)	R 0,002 (MPa)	A % $L_0 = 5,65\sqrt{d}$	KCV (daJ/cm ²)
mesurées	502	409	22,9	+ 20°C : 17 0°C : 19 - 20°C : 16,5
Norme NF A 35 501	510 610	355	≥ 20	0°C ≧ 3,5 E36-3 -20°C ≧ 5 E36-4

La figure 3 montre le dispositif d'essai utilisé. L'éprouvette est sollicitée en flexion 4 points. Cette structure en caisson, du fait des épaisseurs et dimensions utilisées présente un bon compromis entre l'éprouvette de laboratoire et

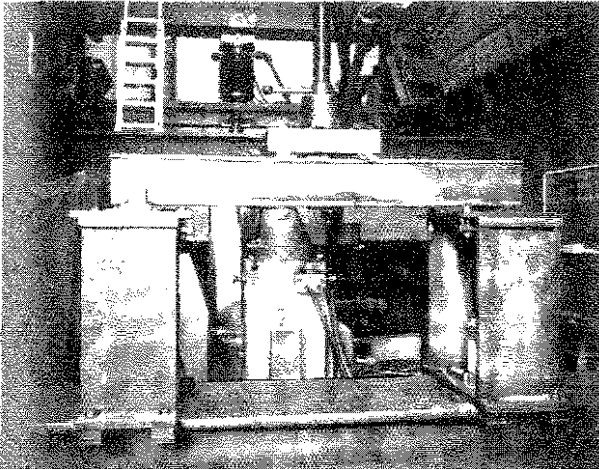


Fig. 3 - Dispositif d'essai.

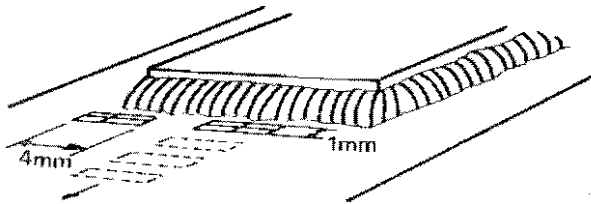


Fig. 4 - Localisation des mesures de contraintes résiduelles.

la structure réelle. En effet, elle possède des dimensions encore modestes vis-à-vis des structures réelles et reste manipulable à la main mais les épaisseurs et dimensions sont suffisantes pour permettre l'établissement des champs de contraintes résiduelles.

Par ailleurs, la configuration choisie permet de modéliser effectivement des cas courants de construction soudée où une semelle soudée reprend des efforts de faible amplitude qui n'interviennent pas dans le calcul du moment fléchissant alors que la discontinuité géométrique obtenue joue un rôle important dans le cas d'une utilisation sous des charges fluctuantes.

III. TRAITEMENTS DE PARACHÈVEMENT

Comme rappelé précédemment, nous avons cherché à classer les traitements qui modifient le champ de contraintes sans intervenir directement sur le profil du cordon. Plusieurs traitements de parachèvement ont été envisagés qui sont couramment utilisés. Il s'agit de :

- **Traitement thermique de détente** classique réalisé entre 550°C et 650°C. Dans ce cas, la température a été de 575°C pendant 1 heure. Cette température située en limite basse des traitements permet normalement d'éviter toute altération des propriétés mécaniques, notamment la résilience.
- **Précharge statique** : elle consiste à relaxer mécaniquement les contraintes résiduelles. L'efficacité du traitement est fonction du niveau de charge appliqué. L'épreuve hydraulique pratiquée sur les appareils à pression est l'exemple le plus connu. Dans le cas présent nous avons exécuté une flexion 4 points avec une contrainte nominale appliquée égale à

95 % de R 0,002. D'où plastification du pied de cordon puisque la concentration de contrainte correspond à un $K_t > 2$.

- Grenailage de précontrainte

Nous ne rappellerons pas ici le principe du procédé. Simplement dans ce cas, deux intensités de grenailage ont été utilisées qui sont fonction du diamètre de billes en acier utilisé

TABLEAU II - CONDITIONS DE GRENAILLAGE DE PRÉCONTRAINTÉ

Repère du traitement	Nature de la grenaille	Repère Norme SAE J 806a	Diamètre moyen des grenailles (mm)	Intensité Almen A mm	Taux de recouvrement
I ₁	Acier coulé	S 230	0,58	0,4-0,45 16-18 A	150 %
I ₂	Acier coulé	S 170	0,43	0,3-0,35 12-14 A	150 %

- Martelage

Il s'agit d'un traitement qui a été réalisé avec un pistolet à aiguilles qui se distingue du martelage avec une panne massive qui remodèle le pied du cordon. Notre martelage ne remodèle pas ou peu le pied du cordon. Il apporte, comme signalé précédemment, des contraintes de compression sur des profondeurs assez importantes. Par analogie au grenailage, l'intensité appliquée a été de 0,3-0,35 mm soit 12-14 A. Les traitements de parachèvement ont été réalisés dans chaque cas sur 3 à 4 éprouvettes toutes essayées en fatigue, l'une d'entre elles étant destinée au suivi de l'évolution des contraintes résiduelles au cours du cyclage.

IV. CARACTÉRISATION DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES

Les contraintes résiduelles sur les éprouvettes brutes de soudage et parachévées ont été caractérisées en surface par la méthode basée sur la diffraction de rayons X. Cette méthode est mise en œuvre par le CETIM qui dispose d'un goniomètre portable ce qui lui a permis de caractériser les contraintes de surface, près de la soudure dans l'axe de l'appendice et dans l'axe du bord de l'appendice (fig. 4).

Les mesures ont été faites avec des taches de dimensions 1 x 4 mm². Les valeurs des contraintes résiduelles mesurées en fonction de la distance au pied du cordon sont données à la figure 5, pour chaque type de traitement et chaque axe de mesure.

On constate que :

1. Les contraintes résiduelles de soudage (BS) sont en général de traction, de niveau maximal nettement plus faible que la limite d'élasticité. Elles sont plus importantes dans l'axe de l'appendice que sur le bord, ce qui est normal, compte tenu de l'influence que présente, dans cette zone, les contraintes résiduelles longitudinales du cordon longitudinal.
2. Le détensionnement relaxe effectivement les contraintes résiduelles, et ce, de façon homogène.
3. La précharge relaxe les contraintes de traction et introduit des contraintes de compression jusqu'à 5 mm du pied de cordon. On peut considérer que cette zone de 5 mm correspond à la zone d'influence géométrique du pied de cordon.

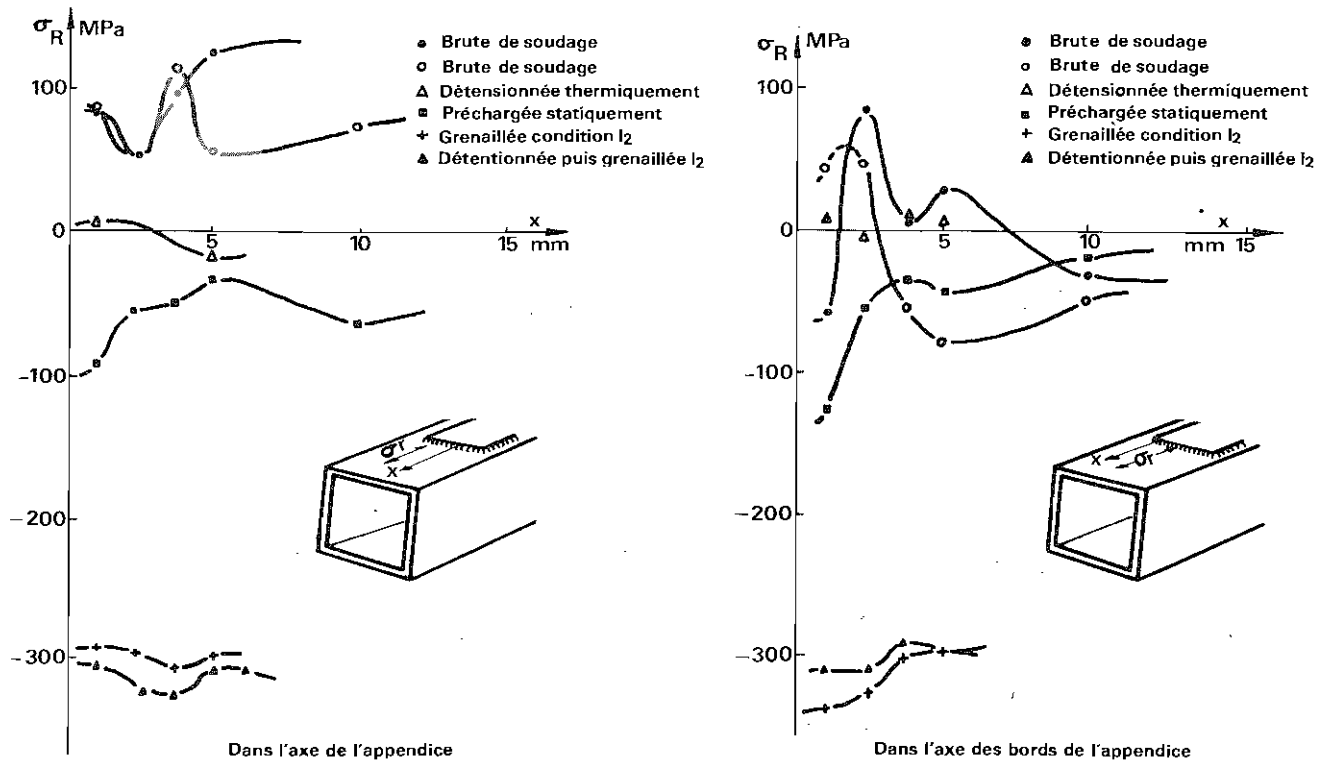


Fig. 5 — Résultat des mesures de contraintes résiduelles.

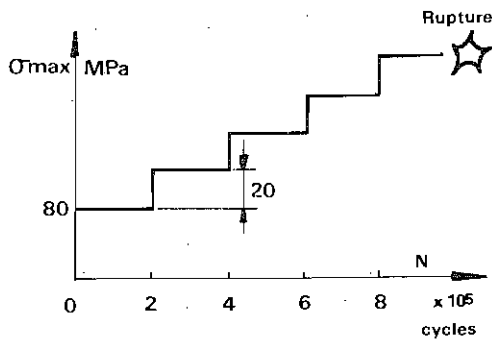


Fig. 6 — Principe de l'essai Locati.

4. Les grenailages et la combinaison, traitement de relaxation/grenailage apportent les résultats les plus importants, on atteint les 3/4 de $R_e 0,002$, la compression est homogène dans une zone qui s'étend sur plus de 5 mm du pied du cordon.

Le traitement thermique n'influe pas sur le niveau atteint en surface mais influe probablement sur l'allure des contraintes dans l'épaisseur.

Essais de fatigue

Les essais de détermination de la limite d'endurance ont été réalisés par la méthode de Locati par paliers de 20 MPa et de $N = 2 \cdot 10^5$ cycles.

Les figure 6 rappelle le principe de cette méthode. Les résultats obtenus sont donnés dans la figure 7.

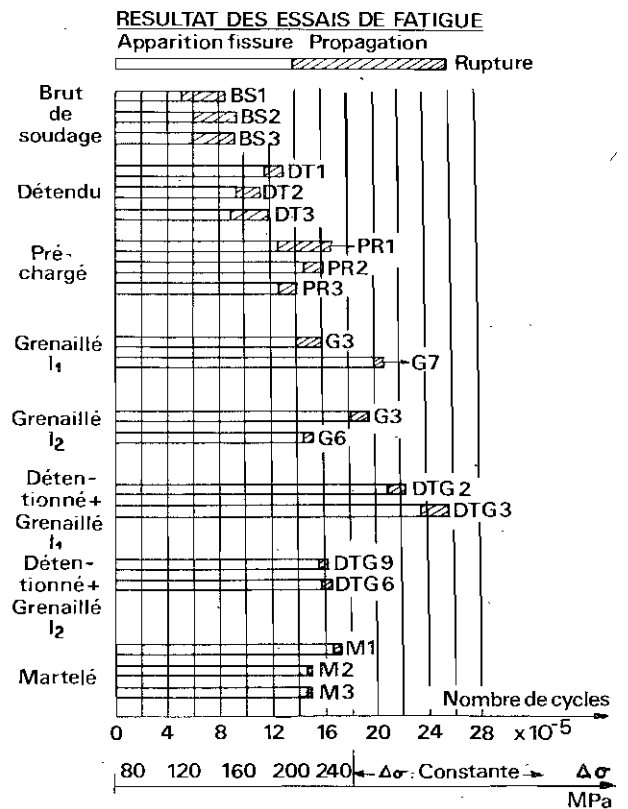


Fig. 7 — Résultats des essais de fatigue.

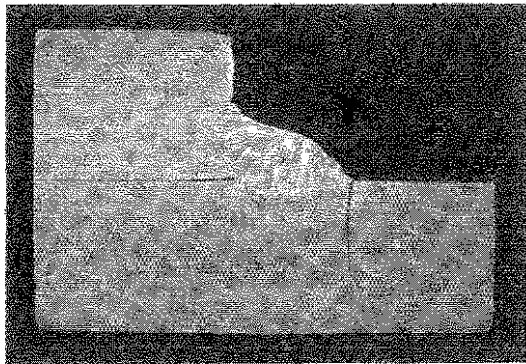


Fig. 8 — Macrographie du profil de la fissure.

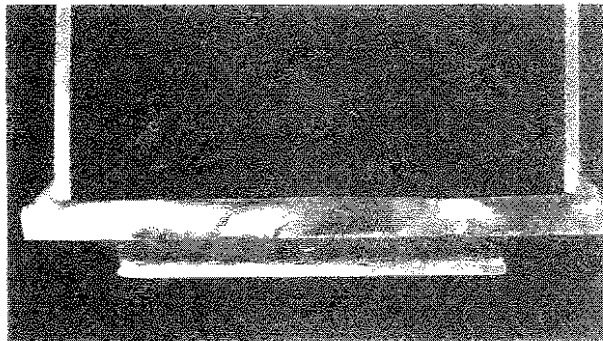


Fig. 9 — Faciès de rupture - Repère : G 5.



Fig. 10 — Faciès de rupture.

Lors des essais, des méthodes de détection d'amorçage de fissure ont été mises en œuvre afin de bien mettre en évidence les nombres de cycle à l'amorçage qui sont portés sur des graphiques.

On distingue immédiatement la faible endurance des éprouvettes brutes de soudage (BS), comparativement aux éprouvettes grenillées ou détendues-grenillées, qui donnent les durées de vie plus importantes. Ces résultats sont donc en concordance avec les niveaux de contraintes résiduelles mis en évidence par diffraction X en surface des éprouvettes.

Le tableau III donne les limites d'endurance obtenues en calculant une contrainte équivalente d'après le document, PD 6493 de la British Standard Institution, basé sur la loi de Miner.

La figure 8 montre le site d'amorçage des fissures de fatigue.

Les figures 9 et 10 montre les faciès de fissuration obtenus. On distingue nettement le site d'amorçage et la zone de propagation de la fissure de fatigue.

TABLEAU III
ÉTENDUES DE CONTRAINTES EQUIVALENTES À L'AMORÇAGE
ET À LA RUPTURE POUR LES DIFFÉRENTS TRAITEMENTS
DE PARACHEVEMENT

État	Amorçage $\Delta\sigma$ (MPa)	Rupture $\Delta\sigma$ (MPa)
Brut de soudage (BS)	68	93
Détensionné (DT)	109	127
Précharge statique (PR)	129	144
Grenailé I_1 (G I_1)	134	158
Grenailé I_2 (G I_2)	158	181
Détensionné + Grenailé I_1 (DT G I_1)	202	210
Détensionné + Grenailé I_2 (DT G I_2)	157	164
Martelé (M)	148	160

Essais avec suivi des contraintes résiduelles

Des essais sont actuellement en cours pour mettre en évidence la relaxation de contraintes résiduelles. Des éprouvettes BS, G₁, G₂, DTG₁, DTG₂, sont soumises à un niveau de contrainte voisin de la limite d'élasticité au pied du cordon de soudure.

On a appliqué un cyclage en fatigue interrompu à différents stades afin d'évaluer l'évolution des contraintes résiduelles.

Les résultats actuels ont mis en évidence l'évanescence des contraintes de soudage et la relative stabilité des contraintes induites pour les procédés mécaniques (grenailage).

V. CONCLUSION

La réalisation d'éprouvettes en caissons reconstituées par soudage et les essais de fatigue qu'elles ont subis, ont mis en évidence :

1. La présence de contraintes résiduelles sur l'état brut de soudage,
2. L'évolution de ces contraintes résiduelles de soudage en cours de cyclage, et la relative stabilité des contraintes induites,
3. La forte influence des traitements de parachèvement du type grenailage, détensionnement + grenailage, martelage, qui augmentent instablement la durée de vie en fatigue,
4. La possibilité par cette méthode d'essai de classer les traitements de parachèvement d'une façon plus réaliste que sur des éprouvettes de dimensions plus faibles.

Conclusions générales

M. BRAMAT (*Institut de Soudure*)

INTÉRÊT DES TRAITEMENTS DE PARACHÈVEMENT

- 1) Tout traitement de parachèvement, quel qu'il soit, apporte une amélioration du comportement en fatigue. Cette amélioration est constituée par une augmentation de la période d'amorçage et ne semble pas avoir d'influence notable sur la propagation.
- 2) L'importance de l'amélioration obtenue est fonction :
 - de la méthode de parachèvement,
 - du type d'assemblage,
 - de la nuance d'acier.

Il faut naturellement souligner que l'emploi de plusieurs techniques de parachèvement, simultanément, permet d'obtenir une amélioration plus importante que celle apportée par l'application d'une seule d'entre celles mises en œuvre. Il convient de remarquer que les effets apportés à cette occasion doivent être complémentaires ; relaxation des contraintes résiduelles de soudage par traitement thermique et précontrainte superficielle par grenailage ou encore meulage du cordon après exécution et précontrainte superficielle par grenailage.

En ce qui concerne l'influence de la nuance d'acier sur l'importance de l'amélioration, on remarque que celle-ci est d'autant plus élevée que la limite d'élasticité est forte. Cet effet permet donc d'envisager l'emploi, pour des constructions soumises à fatigue, d'aciers à haute limite d'élasticité, avec pour conséquence un gain de poids appréciable.

Les traitements de parachèvement sont donc un élément de valorisation de ce type d'acier qui ne présentait pas, sauf cas particulier d'avantage décisif pour les constructions soudées soumises à la fatigue.

MISE EN ŒUVRE DES TRAITEMENTS DE PARACHÈVEMENT

La réparation des constructions fissurées par fatigue constitue le premier - et immédiat - domaine d'emploi des traitements de parachèvement. Quand on se trouve en présence d'une fissuration par fatigue, on élimine, par gougeage et meulage, la fissure et on rebouche la saignée ainsi créée, par soudage. Dans ce cas, la forme globale relative à la conception d'ensemble demeure inchangée et on peut s'attendre à la création d'une nouvelle fissure à plus ou moins long terme. Un ou des parachèvements permettent alors de retarder, voire même de supprimer, cette nouvelle fissuration. Il y a lieu, bien entendu, de choisir judicieusement les traitements qui seront mis en œuvre en tenant compte de leur applicabilité et de leur efficacité. Dans ce contexte, un meulage des cordons après réparation et un grenailage de précontrainte doivent retenir l'attention.

Au niveau de la fabrication, donc de la première exécution d'un assemblage, il est possible d'envisager l'intégration au mode opératoire d'un traitement de parachèvement. Le coût correspondant, d'ailleurs variable d'une méthode à une autre, est compensé par une augmentation du niveau de qualité vis-à-vis de la tenue en service mais grève néanmoins le prix de revient.

Une compensation financière, voire un bénéfice, peut toutefois être escompté s'il est possible d'intégrer l'amélioration obtenue dans le dimensionnement et par là, d'alléger la construction. Cette dernière démarche, qui conduit à une révision en hausse de la contrainte admissible par un assemblage soudé soumis à fatigue, pose toutefois un problème sérieux compte tenu de l'état actuels des connaissances. En effet, les résultats d'essais sont encore en nombre suffisant pour que les améliorations inhérentes à chaque méthode de parachèvement soient quantifiées et par conséquent introduites au niveau des règles de dimensionnement. On peut toutefois estimer que le collationnement des résultats des essais actuellement en cours et que l'analyse de ces résultats mettant en évidence l'importance relative de chaque paramètre influant (effet d'entaille, contraintes résiduelles, ...) permettront dans un avenir relativement proche de résoudre ce premier problème.

Un second problème est constitué par l'industrialisation des différentes techniques de parachèvement dans l'optique de leur intégration à la fabrication. En effet, pour qu'un traitement puisse être applicable, il faut pouvoir :

- définir précisément un mode opératoire,
- qualifier ce mode opératoire,
- contrôler la mise en œuvre.

Dans cet optique, la définition nécessaire du mode opératoire, semble condamner certaines des méthodes proposées, même si elles apparaissent prometteuses, comme le martelage.

RÉSUMÉ DE LA DISCUSSION AYANT SUIVI LA CONFÉRENCE DE MM. LIEURADE ET BRAMAT

M. Salmon — Dans les aciers que vous avez étudiés, existe-t-il une zone suradoucie au voisinage des soudures ?

M. Lieurade — L'acier E 90 au cuivre qui a été étudié, est un acier à grains fins obtenu par laminage contrôlé ; il existe une zone adoucie au voisinage de la soudure, l'amorçage des fissures ne s'est pas produit dans cette zone. Les zones adoucies ont une très faible largeur.

M. de Leiris — En exposant les possibilités de la méthode de parachèvement, M. BRAMAT, a distingué le cas des réparations et le cas des constructions en général. Dans le cas des réparations, on est passé très rapidement, comme si c'était une question simple et réglée. Je voudrais insister sur le procédé de réparation qui consiste à gouger et à souder par dessus la zone gougée. Il faut souder par dessus le gougeage mais s'assurer que le gougeage a éliminé complètement la fissure. Un soudage sur des vestiges de fissure est l'équivalent d'un manque de pénétration de la soudure.

M. Bramat — Je vous remercie pour cette précision ; il faut effectivement gouger pour éliminer la fissure puis recharger pour remplir la saignée. Il n'est pas toujours possible, en réparation, de changer la forme de l'assemblage, quand cette opération est impossible, il faut soigner l'exécution du rechargement et avoir recours à une méthode de parachèvement.

M. Raimbaud — Dans le cas des soudures qui ne sont accessibles que d'un seul côté, est-on condamné à ne rien faire ?

M. Bramat — Le soudeur et le concepteur doivent s'assurer que le point faible d'une soudure reste accessible.

M. Lieurade — On peut tolérer un manque de pénétration pour une soudure, si la racine du cordon n'est pas le siège de contrainte de traction ; cette zone peut être en compression ou en flexion, la partie extérieure de la soudure étant en traction. Cela se produit fréquemment dans les nœuds tubulaires pour l'offshore.

Le Président — Quand on a démarré le nucléaire, il y a 25 ans, on cherchait à l'époque comment faire évoluer la conception pour que les lignes de forces évitent de passer par les points faibles de la construction. Un bon soudeur qui est impliqué dans la conception de l'ouvrage doit placer le joint soudé en fonction des zones de concentration de contraintes.

M. Brozzetti — D'après les conférenciers, il semble que l'on ait intérêt à utiliser en construction des aciers HLES qui ont une bonne tenue à la fatigue. Effectivement, ces aciers sont intéressants quand il est possible de faire un traitement de parachèvement. Des traitements thermiques ne sont pas toujours possibles ; particulièrement dans la construction des ouvrages d'art, de tels traitements reviendraient trop chers. L'appréciation des avantages apportés par l'utilisation des techniques de parachèvement doit se faire en fonction de critères économiques de mise en œuvre. Les résultats expérimentaux obtenus sur des petites éprouvettes ne sont pas extrapolables sur des ensembles de construction en grandeur réelle.

M. Lieurade — On utilise les aciers HLES pour diminuer les sections, le poids des ouvrages, pour améliorer la souplesse, la flexibilité de l'ouvrage. Le traitement de parachèvement qui est assez coûteux, ne doit pas être appliqué systématiquement à toutes les pièces. Dans des structures il faut considérer les zones les plus sollicitées et appliquer le traitement à ces zones.

M. Brozzetti — Sans traitement de parachèvement, y-a-t-il intérêt à utiliser des aciers HLES ?

M. Lieurade — L'intérêt d'utiliser des aciers HLES sans traitement de parachèvement des soudures dépend du type d'assemblage considéré.

Dans le cas d'assemblages bout à bout qui comportent une faible surépaisseur du cordon, correspondant à un faible coefficient de concentration de contrainte, K_t , la limite d'endurance augmente avec la limite d'élasticité. Par contre, dans le cas d'une soudure d'angle conduisant à un K_t élevé, cet effet n'est pas sensible dans des conditions de sollicitations conventionnelles ($R = 0$, $\Delta F = \text{constante}$).

Ces phénomènes sont dus à la présence d'une phase d'amorçage dans le cas des joints bout à bout et à l'absence de celle-ci pour les soudures d'angle.

Un auditeur — Dans quelle mesure la tenue en fatigue dépend-elle de la température de service, notamment dans le cas des basses températures ?

M. Lieurade — Quand la température diminue, les propriétés de traction augmentent, la résistance à la fatigue croît aussi à condition qu'il n'y ait pas de problème de fragilité.