

Influence du Grenailage sur le Comportement en Fatigue d'Assemblages Soudés en Acier HLE

L. Picouet, A. Bignonnet, H.P. Lieurade

*Institut de Recherches de la Sidérurgie Française (IRSID)
78105 Saint Germain en Laye CEDEX, France*

L. Castex

*Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers (ENSAM)
75640 PARIS, France*

RESUME

Des essais de fatigue ont été réalisés sur des assemblages en acier à haute limite d'élasticité ($430 < R_e < 550$ MPa) comportant soit une soudure bout à bout, soit un raidisseur soudé transversalement.

L'effet d'une refusion du pied du cordon à la torche TIG ou d'un grenailage de précontrainte a été étudié en tenant compte :

- de la géométrie du cordon de soudure
- du niveau des contraintes résiduelles au voisinage de la soudure.

Dans le cas du traitement de grenailage de précontrainte, l'évolution des contraintes résiduelles en fonction soit de l'amplitude de contrainte cyclique, soit du nombre de cycles appliqués, a été mesurée en surface et en profondeur par diffraction des rayons X.

MOTS-CLES : Fatigue-assemblages soudés - refusion TIG - grenailage de précontrainte - relaxation des contraintes résiduelles.

INTRODUCTION

Un certain nombre d'études ont montré l'intérêt des aciers à haute limite d'élasticité dans la réalisation d'assemblages soudés, en particulier dans le cas de niveaux élevés de la contrainte moyenne ou d'un chargement sous amplitudes de contrainte variables (1). Par contre, la comparaison de résultats d'essais de fatigue sur des assemblages soudés dans des conditions conventionnelles (contrainte moyenne faible ou nulle, amplitude de contrainte constante) ne fait pas apparaître un avantage significatif des aciers HLE. Ce phénomène est généralement interprété par la faible durée d'amorçage des fissures de fatigue due à la présence inévitable de défauts au pied de cordon, dans le cas de joints brutés de soudage.

Différents traitements de parachèvement permettent d'augmenter cette phase d'amorçage. La présente étude a pour objet de préciser l'influence de tels traitements sur la tenue d'assemblages soudés (cordon perpendiculaire à la sollicitation). Ces traitements appliqués au pied du cordon de soudure ont pour but, soit de diminuer le niveau de concentration de contrainte (meulage local, refusion à la torche TIG), soit de modifier l'état des contraintes résiduelles (grenailage de précontrainte).

CONDITIONS EXPERIMENTALES

MATERIAUX

Trois nuances d'acier de construction ont été utilisées pour réaliser les assemblages soudés. Leurs caractéristiques de traction sont précisées au tableau suivant :

Nuance d'acier (norme AFNOR)	R _e (MPa)	R _m (MPa)	A (%)	Epaisseurs (mm)
E 355	430	540	30,5	8
E 460	460	600	21,5	30
E 490	550	652	25,5	8

EPROUVETTES D'ESSAIS

Deux types d'assemblages ont été étudiés :

Joint soudé bout à bout (fig. 1-a) en acier E355 ou E490.

Les assemblages ont été réalisés par soudage automatique sous flux gazeux (procédé MAG).

Avant essai, les éprouvettes soudées ont subi un traitement de redressage sur un dispositif de flexion, puis un traitement de détensionnement à 600°C ; enfin, le cordon envers a été arasé par fraisage longitudinal. La largeur de la partie utile des éprouvettes était comprise entre 60 et 85 mm.

De plus, dans le cas de l'acier E490, deux autres procédures de soudage ont été utilisées :

- soudage manuel à l'électrode basique
- soudage automatique sous flux solide.

L'effet des deux traitements de parachèvement suivants a été comparé :

- refusion à la torche TIG dans les conditions suivantes :

I (A)	U (V)	Vitesse de la torche (cm/mm)	Angle de torche/pièce
175	14	14	75° à 80°

- grenailage de précontrainte dont les caractéristiques sont les suivantes :

Diamètre billes		Intensité Almen	Taux de recouvrement
norme MIL	∅ moy. (mm)		
170	0,43	14/16 A	200 %

Dans le cas des assemblages en acier E355, le meulage local du pied du cordon à l'aide d'une meule carbure (diam. 3mm) ainsi que l'arasage du cordon ont été réalisés (2).

Joint soudés en T (figure 1-b) en acier E 460.

Ces assemblages ont été réalisés par soudage manuel à l'électrode basique.

Dans ce cas l'influence d'un traitement de grenailage de précontrainte a été étudié.

Dans une première étape, les trois conditions de grenailages suivantes ont été retenues :

Diamètre billes		Intensité Almen	Taux de recouvrement %
Norme MIL	∅ moyen (mm)		
170	0,43	14-16A	200
330	0,84	20-22A	200
550	1,4	8-10C	200

CONDITIONS DES ESSAIS DE FATIGUE :

Assemblages bout à bout

- Les essais de traction ondulée ($R=0,1$) ont été réalisés à des fréquences comprises entre 8 et 25 Hz dans l'air à la température ambiante.
- Les essais ont été conduits à rupture totale des éprouvettes ou jusqu'à une durée de vie maximale égale à 2.10^6 cycles.
- Les limites d'endurance à 2.10^6 cycles ont été déterminées soit à l'aide de la méthode en escalier, soit en utilisant le modèle de BASTENAIRE (3).

Assemblage en T

- Les essais de flexion ondulée ($R = 0,1$) ont été effectués à une fréquence de 10 Hz dans l'air à la température ambiante.
- Les essais ont été conduits à rupture totale des éprouvettes ou jusqu'à une durée de vie maximale de 10^7 cycles.

MESURES DES CONTRAINTES RESIDUELLES

Les mesures des contraintes résiduelles ont été effectuées par diffraction des rayons X. La raie $K\alpha$ d'une anticathode en chrome a été utilisée. Ce sont les plans de la famille $\{211\}$ du fer qui diffractent, un filtre au vanadium a été placé devant le détecteur. La zone irradiée par les rayons X est de $1 \times 20 \text{ mm}^2$. Les courbes de mesures des contraintes résiduelles superficielles, suivant la direction de la sollicitation appliquée, sont présentées en prenant le pied du cordon comme origine.

RESULTATS DES ESSAIS SUR ASSEMBLAGES BOUT A BOUT

Les résultats des essais réalisés en traction sont rassemblés sur le tableau suivant où $\Delta\sigma_D$ est la variation de contrainte correspondant à la limite d'endurance à 2.10^6 cycles et s l'estimation de l'écart-type correspondant.

Acier	Procédure de soudage	$\Delta\sigma_D$ (MPa)	
			s
E 355	MAG	234	26
E 490	MAG	236	32
	manuel à l'électrode	222	25
	automatique sous flux solide	237	18

La figure 2 présente les courbes de Wöhler correspondant aux assemblages en acier E 490.

INFLUENCE DE LA PROCEDURE DE SOUDAGE

Sans traitement de parachèvement, les assemblages étudiés présentent des niveaux de limite d'endurance comparables quelle que soit la limite d'élasticité du métal de base.

La procédure de soudage dans ce cas, ne paraît pas avoir une influence significative.

INFLUENCE D'UN TRAITEMENT DE PARACHEVEMENT

La figure 2 présente l'amélioration des caractéristiques d'endurance apportée par la refusion TIG et le grenailage de précontrainte sur les assemblages en acier E 490.

La figure 3 compare les améliorations apportées par divers traitements de parachèvement sur la limite d'endurance $\Delta\sigma_D$ des assemblages en acier E 355 et E 490.

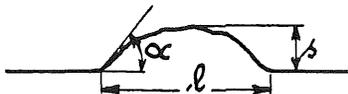
Modification du profil du cordon de soudure

- Concernant les traitements agissant sur la géométrie du cordon, la refusion à la torche TIG du pied du cordon paraît plus efficace que le meulage local ; l'amélioration de la limite d'endurance après refusion TIG est d'autant plus importante que la limite d'élasticité du métal de base augmente : + 40 % pour E 355 à + 60 % pour E 490.

- L'arasage de la soudure donne une amélioration voisine de 50 % (acier E 355).

Dans le cas des assemblages en acier E 490, la géométrie du cordon a été caractérisée à l'aide des paramètres suivants :

- . l'angle de raccordement α
- . la surépaisseur du cordon s
- . la longueur du cordon l .



Procédure de soudage	α (°)	l (mm)	s (mm)	$\Delta\sigma_D$ (MPa)
Manuel	30	19	1,6	230
Automatique	20	8	1,2	240
MAG	20	11	1,8	240
MAG + TIG	5	18	2,3	395

Comme le précise la figure 4, l'angle de raccordement paraît être le paramètre déterminant au niveau de la limite d'endurance $\Delta\sigma_D$.

Modification de l'état des contraintes résiduelles au pied du cordon

Le grenailage de précontrainte effectué conduit à une amélioration de la limite d'endurance voisine de 50 %.

L'évolution en surface des contraintes résiduelles de compression, introduites par le grenailage a été mesurée en fonction, d'une part, du niveau de l'amplitude de contrainte appliquée, d'autre part, du nombre de cycles imposés aux assemblages soudés (figures 5a et 5b). Les points suivants sont mis en évidence :

- . Au voisinage de la limite d'endurance, on n'observe pas de relaxation des contraintes résiduelles. Dans ce cas, celles-ci peuvent être considérées schématiquement (figures 6a et 6b) comme des contraintes statiques qui viennent s'ajouter algébriquement à la contrainte moyenne du chargement cyclique.

- . Pour des niveaux supérieurs à la limite d'endurance, la figure 5 montre que la relaxation des contraintes résiduelles initiales augmente avec $\Delta\sigma$ et avec N .

RESULTATS DES ESSAIS SUR ASSEMBLAGES EN T

CHOIX DES CONDITIONS DE GRENAILLAGE DE PRECONTRAINTE

Compte tenu de la redistribution des contraintes résiduelles, observée dans le cas des assemblages bout à bout, une optimisation du traitement de grenailage de précontrainte a été réalisée dans le cas des assemblages en T. Pour cela, des essais de fatigue ($\Delta\sigma = 300$ MPa, $R = 0,1$) ont été effectués pour les conditions de grenailage précisées plus haut.

Les paramètres suivants ont été considérés :

- le niveau des contraintes de compression introduites,
- la profondeur affectée par le traitement,
- la redistribution des contraintes résiduelles mesurée après essais.

Pour évaluer ces paramètres, des mesures par diffraction des rayons X ont été faites avant et après essai de fatigue.

- . Mesure avant essai de fatigue

Le tableau suivant montre que les contraintes résiduelles les plus faibles sont obtenues dans le cas du grenailage 14-16 A (figure 8a).

Intensité Almen	σ (MPa)	Profondeur affectée (mm)
14-16 A	- 300	0,25
20-22 A	- 400	0,5
8-10 C	- 400	0,5

. Mesures après essai de fatigue

Les assemblages soudés ont été conduits à rupture. Les mesures de diffraction des rayons X réalisés après essai, à une distance de 5 mm du pied du cordon, présentent une redistribution complète des contraintes résiduelles en profondeur quel que soit le type de grenailage de précontrainte (figure 8b).

Le grenailage 14-16A a été écarté car il correspond aux valeurs de contraintes résiduelles les plus faibles. Le grenailage 20-22 A a été retenu car il conduit à des contraintes résiduelles de compression et une profondeur affectée élevée ; de plus le diamètre des billes (0,84 mm) est légèrement inférieur à la taille minimale (environ 1 mm) des défauts présents au pied du cordon de soudure.

RESULTATS DES ESSAIS DE FATIGUE

Le grenailage 20-22 A a été appliqué à une série d'assemblages en T. Au cours des essais de fatigue, les durées de vie à l'amorçage ont été déterminées à l'aide d'une méthode différentielle par variation de l'impédance électrique de l'éprouvette (4).

La figure 9 compare les résultats obtenus sur éprouvettes à l'état brut de soudage et après le traitement de grenailage de précontrainte choisi.

Dans tous les cas, le grenailage de précontrainte apporte une amélioration du comportement à la fatigue. Dans le domaine des grands nombres de cycles (10^6 - 10^7 cycles), la résistance à la fatigue est multipliée par deux.

CONCLUSION

La présente étude a mis en évidence l'effet bénéfique de traitements de parachèvement dans le cas d'assemblages soudés en aciers à haute limite d'élasticité. Les points suivants ont été précisés :

- à l'état brut de soudage, les assemblages bout à bout étudiés présentent une limite d'endurance comparable et voisine de $\Delta\sigma_D = 220$ MPa ($R = 0,1$) quel que soit le procédé de soudage ou le niveau de limite d'élasticité.

- un traitement de parachèvement peut apporter une amélioration de la limite d'endurance de l'ordre de 60 %,

- cette amélioration est due soit à une diminution de l'angle de raccordement du cordon et de la tôle (meulage, refusion TIG), soit à l'application de contraintes résiduelles de compression (grenailage de précontrainte),

- au niveau de la limite d'endurance, les contraintes résiduelles apportées par un grenailage de précontrainte peuvent être considérées comme des contraintes statiques qui viennent s'ajouter algébriquement à la contrainte moyenne du chargement cyclique,

- pour des niveaux de l'amplitude de contrainte supérieurs à la limite d'endurance la relaxation des contraintes résiduelles apportées par le grenailage est d'autant plus importante que $\Delta\sigma$ est élevée ou que N est grand,

- le choix d'un traitement de grenailage de précontrainte optimal passe donc par l'étude de la relaxation en surface et en profondeur du champ des contraintes résiduelles induit par ce traitement.

Les résultats de cette étude montrent l'intérêt d'utiliser les nuances à plus haute limite d'élasticité, dans le cas de structures métalliques soumises à la fatigue, à condition toutefois d'effectuer un traitement de parachèvement adéquat des assemblages soudés les plus sollicités.

BIBLIOGRAPHIE

- (1)- H.P. LIEURADE
Métaux-Corrosion-Industrie n° 609, mai 1976, p. 185-200.
- (2)- H.P. LIEURADE, J.C. TOURRADE
Mémoires et Etudes Scientifiques - Revue de Métallurgie, septembre 1983, p. 450.
- (3) - F. BASTENAIRE
La fatigue dans les matériaux - Ed. Ediscience, 1973, p. 107-144.
- (4) - B. MARANDET, G. LABBE, J. PINARD, M. TRUCHON
Rapport IRSID RE 549, 1978.

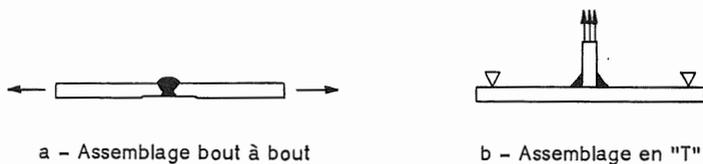


Figure 1 - Assemblages soudés étudiés.

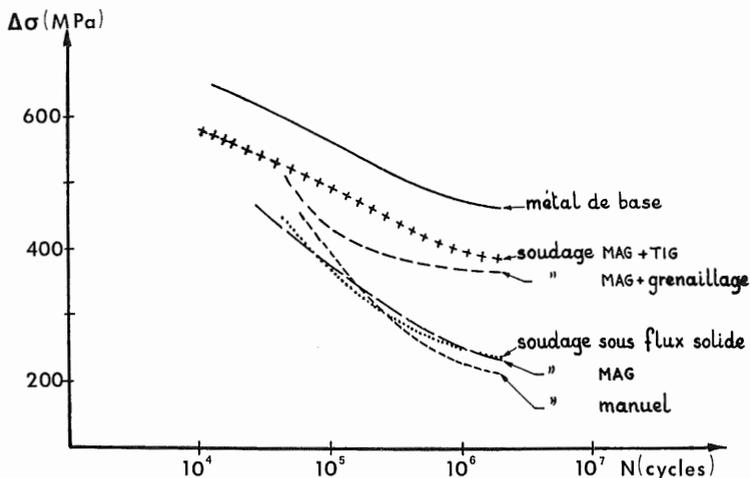


Figure 2 - Comparaison des courbes de Wöhler dans le cas de l'acier E 490.

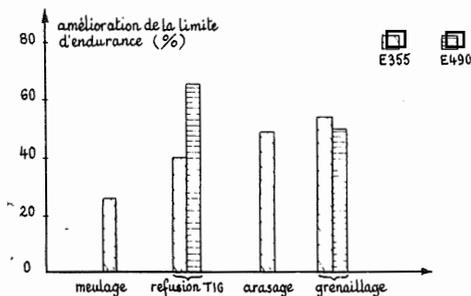


Figure 3 - Amélioration de $\Delta\sigma_D$, en fonction du traitement de parachèvement.

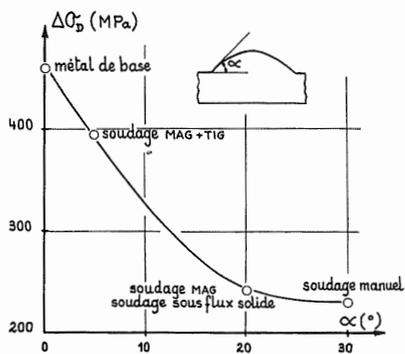
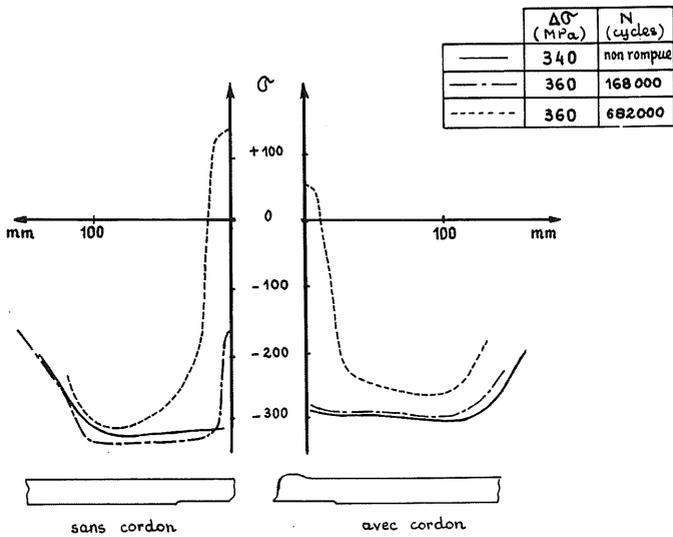
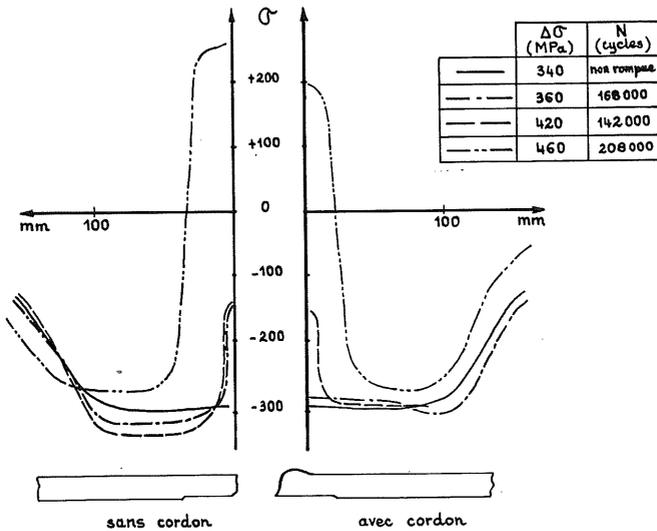


Figure 4 - Rôle de la géométrie du cordon de soudure sur la limite d'endurance $\Delta\sigma_D$ (acier E 490).



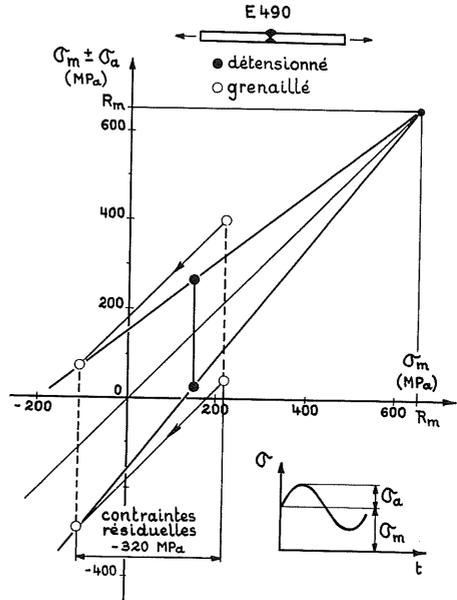
a - Influence de N ($\Delta\sigma = 360$ MPa).



b - Influence de $\Delta\sigma$ ($N \simeq 1,8 \cdot 10^5$ cycles).

Figure 5 - Evolution superficielle des contraintes résiduelles de grenailage sur des assemblages bout à bout en acier E 490 (soudage MAG).

a) - E 490



b) - E 355

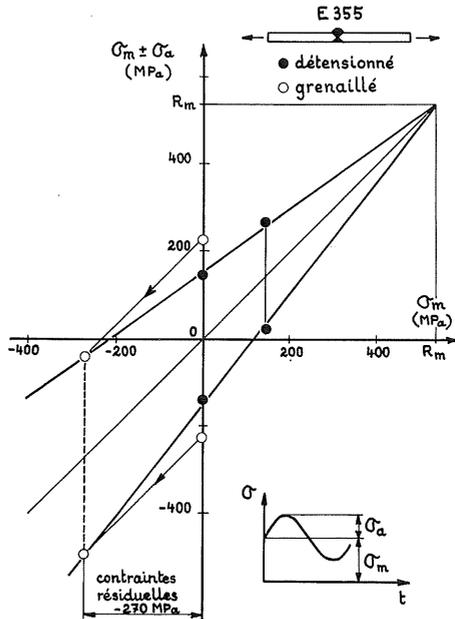


Figure 6 - Schématisation de l'influence des contraintes résiduelles sur la limite d'endurance : diagramme de Goodman des aciers E 490 et E 355.

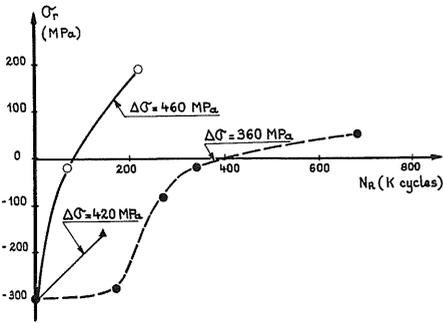


Figure 7 - Evolution des contraintes résiduelles au pied du cordon au cours de la sollicitation de fatigue

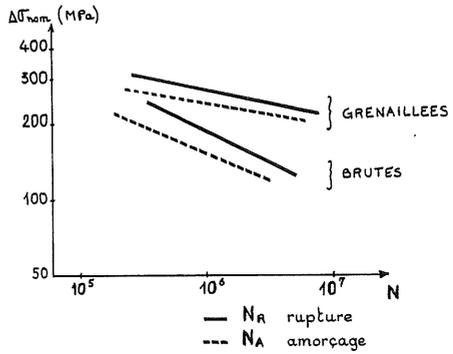
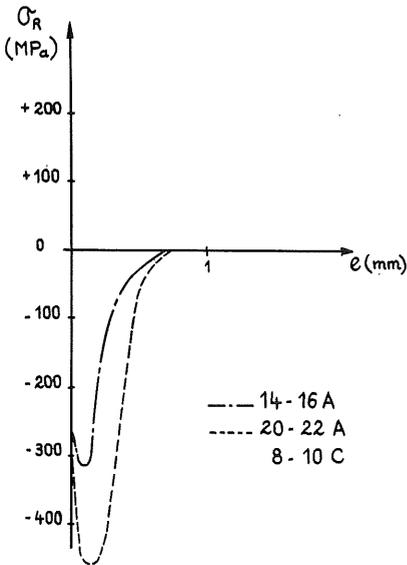
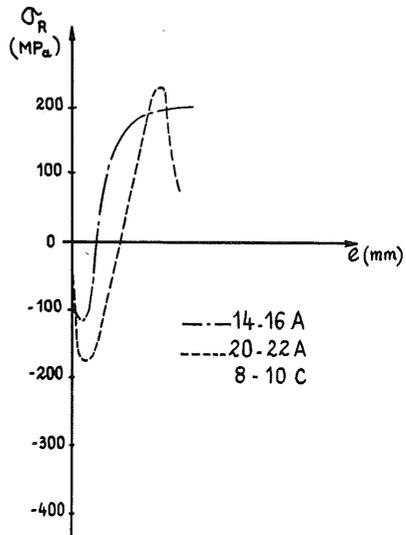


Figure 9 - Comparaison des comportements en fatigue d'assemblages bruts de soudage et grenailles



a - Avant essai de fatigue



b - Après essai de fatigue

Figure 8 - Evolution des contraintes résiduelles suivant l'épaisseur dans la région du pied du cordon