Fissuration par fatigue d'assemblages soudés en acier HLE

Autor(en): **Lierade, H.-P. / Maillard-Salin, C. / Truchon, M.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE reports = Rapports AIPC = IVBH Berichte**

Band (Jahr): **37 (1982)**

PDF erstellt am: **20.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-28904

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Fissuration par fatigue d'assemblages soudés en acier HLE

Ermüdungsrissbildung in Schweissverbindungen hochfester Stähle

Fatigue Crack Growth in Welded Joints in HSLA Steels

H.-P. LIEURADE
Institut de recherche de la sidérurgie française
Saint-Germain-en Laye, France

C. MAILLARD-SALIN
Institut de recherche de la sidérurgie française
Saint-Germain-en Laye, France

M. TRUCHON
Institut de recherche de la sidérurgie française
Saint-Germain-en Laye, France

RESUME
Les aciers à haute limite d'élasticité (HLE) sont de plus en plus utilisés dans le cas des structures métalliques soumises à des sollicitations cycliques. Pour concevoir ces structures en toute sécurité, il est nécessaire de connaître le comportement en fatigue de tels aciers. C'est pourquoi cette étude concerne des aciers de limites d'élasticité comprises entre 280 et 520 MPa. Pour ces nuances, les vitesses de fissuration du métal de base et de la zone affectée par la chaleur ont été comparées. L'influence de la limite d'élasticité et de l'épaisseur de la tôle ainsi que du niveau des contraintes résiduelles a été prise en compte.

ZUSAMMENFASSUNG
Die Verwendung von hochfesten Stählen für Konstruktionen, die wechselnder Beanspruchung ausgesetzt sind, ist in stetem Anwachsen. Zur sicheren Erstellung derartiger Bauten ist die Kenntnis des Ermüdungsverhaltens dieser Stähle nötig. Die vorliegende Untersuchung befasst sich mit Stählen, deren Streckgrenzen zwischen 280 und 520 MPa liegen. Die Rissausbreitungsgeschwindigkeit im Grundmetall wird mit derjenigen in der Wärmeinflusszone verglichen, und zwar unter Berücksichtigung der Streckgrenze, der Blechdicke und des Eigenspannungsniveaus.

SUMMARY
The steadily increasing use of high strength low alloy steels in cyclically loaded structures requires a knowledge of their fatigue behaviour for safe design. This paper deals with steels whose yield stresses range from 280 to 520 N/mm^2. Fatigue crack growth rates are compared in the base metal and heat affected zone with the influence of yield strength, plate thickness and residual stress level also being considered.

I - INTRODUCTION

En construction métallique une meilleure connaissance de la résistance des aciers, d'une part, des contraintes en service, d'autre part, a permis aux constructeurs de diminuer considérablement les coefficients de sécurité employés au cours des calculs. Le poids propre d'une structure peut représenter alors une source de sollicitations non négligeable. Pour alléger les structures, l'emploi d'aciers à haute limite d'élasticité (HLE), permettant de réduire les épaisseurs à mettre en oeuvre, est de plus en plus souvent envisagé par les constructeurs métalliques.

Pour une structure métallique soudée la détermination des caractéristiques de fatigue peut être faite :
- soit par le tracé expérimental de courbes de Wöhler ou courbe σ-N, où σ est l'amplitude de contrainte imposée et N la durée de vie correspondante.
- soit par le calcul de la durée de vie en fissuration de la structure, sans tenir compte de la durée d'amorçage. Des études récentes [1 à 3] montrent en effet qu'à partir de défauts de soudage : soufflures, manques de pénétration, inclusions de laitier, etc .. , le stade d'amorçage d'une fissure de fatigue peut être négligeable. La durée de vie en propagation d'un joint donné correspond alors au nombre de cycles nécessaires pour faire propager une fissure de fatigue de défauts initiaux de taille connue jusqu'à la rupture du joint.

La présente étude a pour but de fournir des données quantitatives concernant la cinétique de propagation des fissures de fatigue dans le métal de base (MB) et dans la zone affectée par la chaleur (ZAC), pour des aciers ayant des limites d'élasticité échelonnées.

2 - CONDITIONS EXPERIMENTALES

2.1. Nuances d'aciers

Cette étude concerne quatre aciers de construction métallique :
- trois aciers de qualité courante : E24-4, E355 et A70-2 (normes AFNOR 35-501, 36-201), les éprouvettes étant prélevées dans des tôles laminées à 12 mm d'épaisseur.
- un acier pour lequel les propriétés de striction dans le sens de l'épaisseur, perpendiculairement à la surface sont garanties : E36-4 Z35 (norme AFNOR 36-202), les éprouvettes étant prélevées dans des tôles laminées à 20 et 40 mm d'épaisseur.

La composition chimique des aciers étudiés est précisée dans le tableau 1.

Tableau 1.

Acier	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	V	Al	N_2	Cu	Mo	Nb
E24	0,10	0,74	0,19	0,015	0,019								
E36-Z	0,145	1,40	0,292	0,006	0,003	0,42	0,075		0,019	0,012		0,031	
E355	0,15	1,35	0,30	0,016	0,019								0,022
A70	0,20	1,41	0,38	0,092	0,012	0,10	0,03	0,15	0,04	0,014	0,18	0,01	

Les quatre nuances ont été étudiées à l'état normalisé.

Les caractéristiques de traction monotones et cycliques (R'_e, n') mesurées en long, sont rassemblées dans le tableau 2.

Tableau 2.

Acier	Re (MPa)	Rm (MPa)	A (%)	Z (%)	R'_e (MPa)	n'
E 24	280	400	42,5	78,5		
E 36-Z	375	545	34,2	77	350	0,21
E 355	395	540	35,5	74,5	325	0,16
A 70	515	660	24	54		

2.2. Eprouvettes d'essais

Les éprouvettes utilisées pour déterminer les vitesses de fissuration sont du type ASTM CT.

- Joints soudés en croix

Les joints sont constitués d'une tôle sur laquelle deux ailettes ont été rapportées (figure 1).

Pour les aciers E24 et E355, un soudage automatique sous flux (ASTM-AWS 62 EL12) a été réalisé.

Pour les aciers de nuance A70, un soudage manuel a été utilisé avec des électrodes à enrobage basique (ASTM-A 316 1969).

- Joints soudés bout-à-bout

Dans le cas de la nuance E36-Z35, une préparation en V dissymétrique a été utilisée (figure 2). Le soudage manuel à l'arc a été réalisé avec des électrodes au C-Mn (ASTM-AWS E 7018).

- Prélèvement

Aussi bien dans le cas du métal de base que dans celui des joints soudés (figures 1 et 2), les éprouvettes ont été prélevées en sens long : la fissure se propage dans toute l'épaisseur de la tôle, perpendiculairement au sens de laminage.

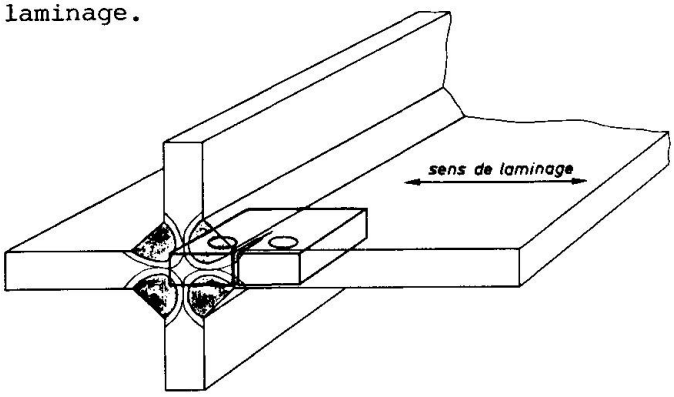

Figure 1 Prélèvement des éprouvettes dans les joints soudés en croix

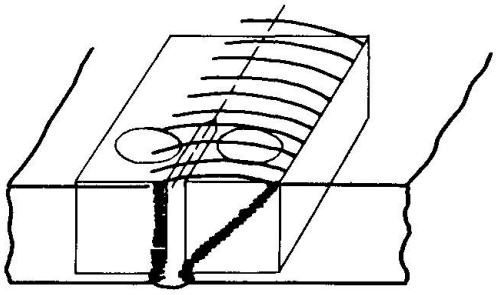

Figure 2 Prélèvement des éprouvettes dans les joints soudés bout à bout

2.3. procédure d'essai

- Tous les essais ont été effectués à l'air ambiant, à une température voisine de 20°C. Les éprouvettes ont été sollicitées en traction ondulée (rapport de charge R_s égal à 0,1 ou 0,7). La fréquence du cycle de chargement était comprise entre 5 et 110 Hz.
- La mesure de la longueur de la fissure a été faite en surface, soit par méthode optique soit à l'aide de divers dispositifs automatiques de suivi de fissure.
- A partir des données enregistrées (a,N), le calcul de la vitesse de fissuration da/dN en fonction de l'amplitude, ΔK, du facteur d'intensité de contrainte a été effectué automatiquement par ordinateur.

3 - RESULTATS DES ESSAIS

Les figures 3 à 6 comparent les résultats obtenus dans le métal de base et la ZAC, pour les 4 nuances étudiées.

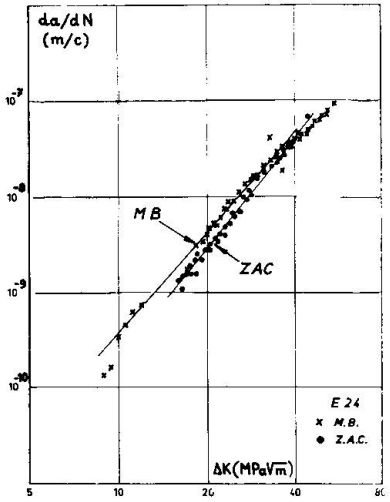

Figure 3 Evolution de da/dN = f (ΔK) Acier E24

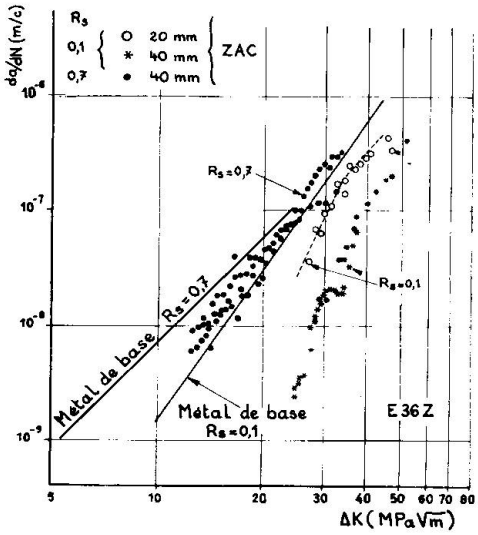

Figure 4 Evolution de da/dN = f (ΔK) Acier E36-Z

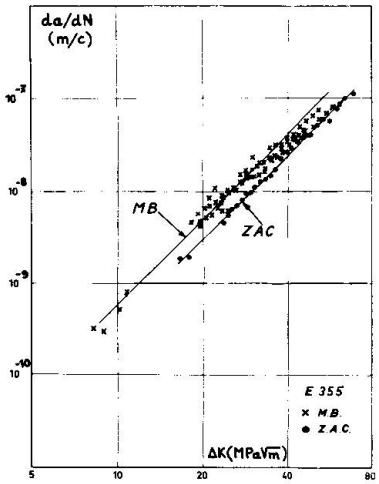

Figure 5 Evolution de da/dN = F (ΔK) Acier E355

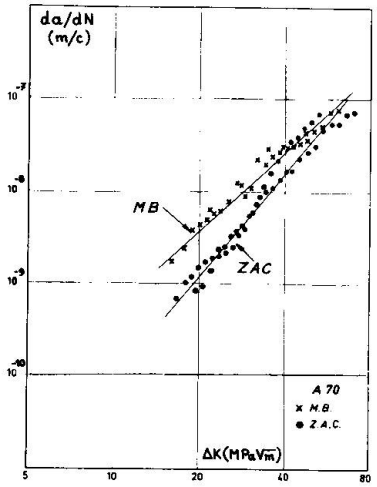

Figure 6 Evolution de da/dN = f (ΔK) Acier A70

Dans chaque cas, les coefficients C et m de la loi de vitesse de fissuration suivante ont été calculés :

$$da/dN = C\ (\Delta K)^m$$

Ces coefficients sont reportés dans le tableau 3.

Tableau 3

Acier	E 24		E 36-Z					E 355		A70	
	MB	ZAC	MB		ZAC			MB	ZAC	MB	ZAC
Epaisseur	10	10	20/40		20	40		10	10	10	10
R_s	0,1	0,1	0,1	0,7	0,1	0,1	0,7	0,1	0,1	0,1	0,1
m	3,5	3,8	4,5	3,1	(7)	(9,3)	3,8	2,9	3,3	2,8	4,1
C (10^{13})	12	3,4	0,41	60	(0,05)	(3.10^{-5})	46	9,3	14	86	0,39

4 - DISCUSSION DES RESULTATS

4.1. Corrélation entre m et C

Plusieurs auteurs [1, 2] ont montré que les coefficients de la loi de fissuration ne sont généralement pas indépendants. Une relation linéaire entre m et log C a été trouvée. Récemment GURNEY [3] a donné une application de cette relation au cas des aciers de construction métallique, incluant aussi des résultats obtenus dans le cas du métal fondu (MF) et de la ZAC. La corrélation qu'il obtient entre m et C lui permet d'écrire que la largeur du faisceau des droites log da/dN - log ΔK est minimale au point de coordonnées :

$$da/dN = 1{,}32.\ 10^{-7}\ \text{m/cycle} \qquad \Delta K = 28{,}3\ \text{MPa}\ \sqrt{m}$$

Sur le diagramme m-logC de la figure 7 nous avons reporté :
- les résultats compilés par GURNEY,
- des résultats obtenus à l'IRSID sur des aciers de construction [4],
- les résultats de la présente étude, obtenus aussi bien dans le métal de base que dans la ZAC, pour des épaisseurs de tôle égales à 10 mm.

L'ensemble des résultats vérifie bien la relation proposée par GURNEY ; cette relation permet de limiter la discussion à l'étude de l'évolution d'un seul coefficient de la loi de vitesse de fissuration. C'est pourquoi par la suite nous caractériserons le comportement en fissuration par l'exposant m.
On peut noter cependant que cette relation n'est pas vérifiée pour les épaisseur 20 et 40 mm (acier E 36-Z).

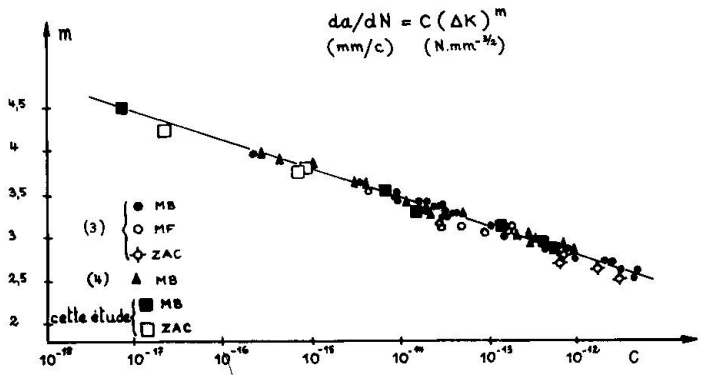

Figure 7 Relation entre m et log C

4.2. Variation de la loi de fissuration en fonction de la limite d'élasticité

Nous avons reporté sur le diagramme m - R_e de la figure 8 de nombreux résultats obtenus sur des aciers de construction métallique [3] et mécanique [5], ainsi que ceux obtenus sur les aciers étudiés dans ce travail.

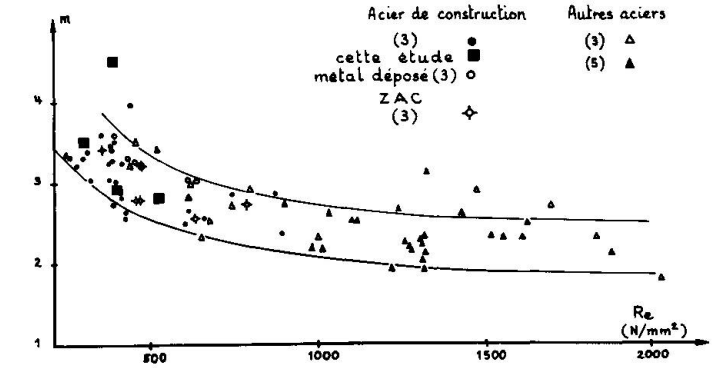

Figure 8 Evolution de m en fonction de R_e

L'ensemble des résultats présente en moyenne une diminution de l'exposant m quand R_e augmente. La bande de dispersion des résultats est relativement large : pour une valeur R_e donnée, m est connu à environ $\pm$ 15 %. En ce qui concerne les 3 aciers de qualité courante étudiés, m passe de 3,5 à 2,8 quand R_e augmente de 280 à 515 MPa.

L'acier E36-Z a un comportement sensiblement différent ; le niveau de m (4,5) est élevé compte tenu de sa limite d'élasticité. La considération de la limite d'élasticité cyclique, R'_e, ne permet pas d'expliquer les différences de comportement entre les aciers E355 et E36-Z. Par ailleurs, BAUS et coll [6] ont montré que la vitesse de fissuration dépendait des capacités d'écrouissage

cyclique du matériau et qu'il existait une relation entre m et n' (coefficient d'écrouissage cyclique). La relation moyenne proposée, m = 20 n', indique que pour des matériaux présentant une rupture ductile, la vitesse diminue (m croît) lorsque le coefficient d'écrouissage cyclique augmente.
Dans le cas des aciers E36-Z et E355, les valeurs de m estimées à l'aide de n' (respectivement 4,2 et 3,2) sont proches des valeurs expérimentales (respectivement 4,5 et 2,9). La valeur élevée de n' (0,21), qui conduit à un très bon comportement en fissuration, semble reliée à l'analyse chimique de l'acier E36-Z, en particulier aux bas niveaux en S et P et peut être à la présence de Ni (tableau 1).

4.3. Effet de divers paramètres sur la loi de fissuration dans la ZAC

- Limite d'élasticité du métal de base.
L'influence des caractéristiques mécaniques du métal de base a été considérée dans le cas des aciers E24, E355 et A70 étudiés en épaisseur 10 mm.

La vitesse de fissuration de la ZAC est toujours inférieure à celle du métal de base. L'écart entre ces vitesses de fissuration varie en fonction de ΔK. Pour quantifier cette évolution, nous avons calculé le rapport des vitesses de fissuration de la ZAC et du MB pour ΔK égal à 20 et 40 MPa$\sqrt{m}$, et le rapport des niveaux de m obtenus respectivement dans la ZAC et le métal de base.
Les résultats de ces calculs sont rassemblés dans le tableau 4.
Tableau 4

Nuance de l'acier	R_e (MPa)	$(da/dN)_{MB}/(da/dN)_{ZAC}$		m_{ZAC}/m_{MB}
		ΔK (MPa$\sqrt{m}$) 20	40	
E24	280	1,6	1,2	1,09
E355	395	1,9	1,3	1,14
A70	515	3,1	1,7	1,46

Pour un même niveau ΔK, l'écart entre les vitesses augmente avec la limite d'élasticité du métal de base : pour ΔK = 20 MPa$\sqrt{m}$, le rapport $(da/dN)_{MB}/(da/dN)_{ZAC}$ passe de 1,6 pour l'acier E24 à 3,1 pour l'acier A70.

Cet écart tend à diminuer aux plus fortes valeurs de ΔK : dans tous les cas, les résultats dans le métal de base et la ZAC se superposent pour ΔK élevé.

De même, le rapport m_{ZAC}/m_{MB} augmente sensiblement avec la limite d'élasticité du métal : il croît de 1,09 à 1,46 quand R_e passe de 280 à 515 MPa.

- Epaisseur de la tôle
L'acier E36-Z a été étudié en 2 épaisseurs (20 et 40 mm). Les résultats présentent (figure 4) un effet significatif de l'épaisseur sur la vitesse de fissuration dans la ZAC. La réduction très importante des vitesses de fissuration dans le cas de l'épaisseur 40 mm est due à la présence de contraintes résiduelles de compression à coeur de l'éprouvette [7]. La loi de PARIS est mal vérifiéée, les valeurs de m et C que l'on peut cependant estimer ne suivent pas la relation trouvée entre m et log C .

- Rapport de charge ($R_s = \sigma_{min}/\sigma_{max}$)
Dans le cas de l'acier E36-Z soudé en 40mm d'épaisseur, deux niveaux de R_s ont été étudiés (0,1 et 0,7). La figure 5 montre que, pour R_s = 0,1 les écarts entre les vitesses de fissuration sont grands entre le métal de base et la ZAC ; pour ΔK = 20 MPa m le rapport $(da/dN)_{MB}/(da/dN)_{ZAC}$ est supérieur à 30.

Par contre pour $R_S = 0,7$ les différences sont sensiblement plus faibles ; m_{ZAC}/m_{MB} passe de 2 à 1,2 quand R_S passe de 0,1 à 0,7.

- Traitement thermique de détensionnement.

Comme le présente la figure 9, dans le cas de joints en acier E36-Z (épaisseur 40 mm), la loi de vitesse de fissuration de la ZAC, après traitement de détensionnement, est comparable à celle du métal de base.

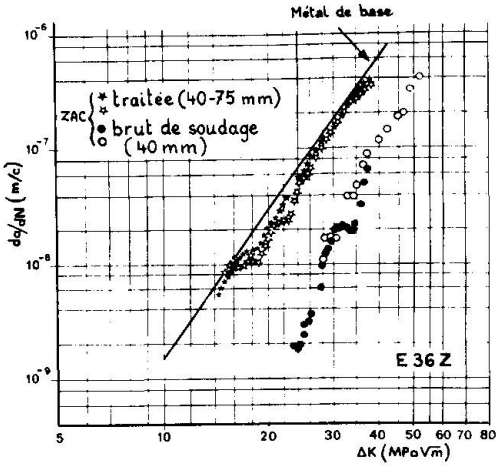

Figure 9 Effet d'un traitement de détensionnement

4.4. Phénomènes de fermeture à la pointe de la fissure

Au cours d'un essai en traction repétée la plastification cyclique peut conduire à une fermeture à la point de la fissure. On peut analyser les résultats en considérant que l'endommagement se fait quand la fissure est ouverte cette partie du cycle étant caractérisée par ΔK_{eff}.

La figure 10 présente une application de ce concept dans le cas de la fissuration dans la ZAC d'un joint en acier E36-Z. Les résultats pour $R_S = 0,1$ exprimés en fonction de ΔK_{eff}, se superposent à ceux obtenus sur le métal de base pour $R_S = 0,7$, valeur pour laquelle la fissure est complètement ouverte. Ce même concept a été utilisé pour rendre compte de l'effet de R_S sur la vitesse de fissuration du métal de base [8].

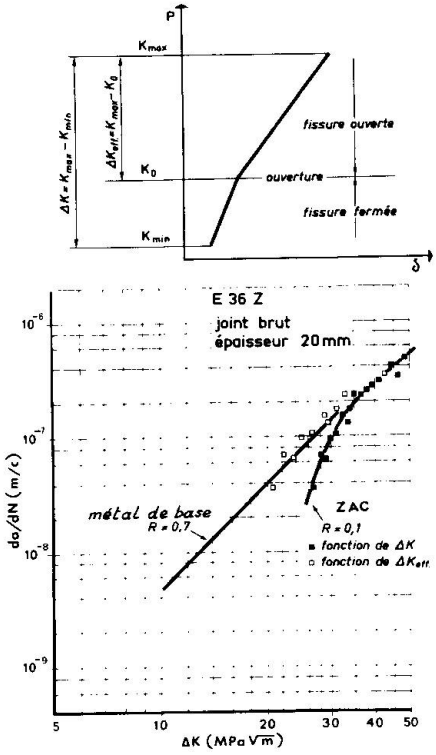

Figure 10 Vitesse de fissuration en fonction de ΔK_{eff}

En fait, quelles que soient les conditions de sollicitation (niveau R_S, présence de contraintes résiduelles de soudage) on obtient une courbe unique si l'on ne s'intéresse qu'à la portion du cycle pendant laquelle la fissure est complètement ouverte.

L'ensemble des résultats présentés s'explique donc par l'évolution des contraintes résiduelles existant à la pointe de la fissure.

Ces observations permettent aussi d'expliquer les résultats souvent contradictoires obtenus dans la littérature, en prenant en compte le niveau et le signe des contraintes résiduelles résultant de la procédure de soudage et du mode de prélèvement des éprouvettes. Enfin on peut en déduire que l'augmentation des capacités d'écrouissage cyclique d'un acier (croissance de n') par une analyse chimique ou des traitements thermomécaniques adaptés doit conduire à des caractéristiques de résistance à la fissuration plus élevées.

5 - CONCLUSIONS

- Pour des tôles de faible épaisseurs (< 20 mm), la vitesse de fissuration, par fatigue, $da/dN = C\ (\Delta K)^m$, dans la zone affectée par la chaleur, est légèrement inférieure à celle du métal de base, quand $\Delta K < 30$ MPa $\sqrt{m}$.
- On trouve, dans ce cas, une relation linéaire entre m et logC, correspondant à la fissuration dans le métal de base ou dans la zone affectée par la chaleur.
- L'écart s'accentue quand on fait croître l'épaisseur ou la limite d'élasticité de la tôle. Les résultats ne vérifient plus les relations précédentes.
- L'application de R_S élevés ($\geq 0,7$) ou l'application d'un traitement de détensionnement conduit à des lois de fissuration voisines de celle du métal de base.
- L'ensemble des résultats expérimentaux s'interprète par les phénomènes de fermeture de la fissure dus aux contraintes locales monotones (résultant du soudage ou de l'application d'une contrainte statique) ou cycliques (conséquence de la plastification à la pointe de la fissure).
- D'un autre côté, on peut augmenter considérablement la résistance à la fatigue des assemblages soudés par divers procédés post-soudage qui agissent sur la phase d'amorçage et dont l'efficacité croît avec la limite d'élasticité de la tôle. [9].

REFERENCES

1. KITAGAWA (H), MISUMI (M),. An estimation of effective stress intensity factors by a crack model considering the mean stress.
   1st Jap. Nat. Symposium on Fracture Mechanics Jap. Soc. Mech. Eng. Juin 1981, pp. 710-717.

2. BAUS (A), CHARBONNIER (J.C.), LIEURADE (H.P.), MARANDET (B), ROESCH (L), SANZ (G). Etude par la mécanique de la rupture de la ténacité, de la fissuration par fatigue et de la fissuration par corrosion sous contrainte d'aciers à très haute résistance.
   Mém. Scient. Rev. Mét. Décembre 1975, pp. 891-935.

3. GURNEY (T.R.). An analysis of some fatigue crack propagation data of steels subjected to pulsating tension loading.
   Welding Research International. Vol. 9, n° 4, pp. 45-58.

4. REGNIER (L), TRUCHON (M). Travaux non publiés.

5. LIEURADE (H.P.). Thèse d'Etat. Metz 1978.

6. BAUS (A), LIEURADE (H.P.), MICHAUT (B), TRUCHON (M). Relation entre les paramètres de fissuration et les caractéristiques cycliques d'une gamme étendue d'aciers.
   4ème Conf. Int. sur "la Résistance des Métaux et Alliages". Nancy 1976.

7. TRUCHON (M), LIEURADE (H.P.), PUTOT (C). A study of fatigue crack propagation in E36 steel welded joints.
   Conf. Int. "L'acier dans les Structures Marines". Paris Octobre 1981.

8. BENOIT (D), LIEURADE (H.P.), MILLE (P), PLUVINAGE (G). Phénomène de fermeture à la pointe d'une fissure de fatigue dans le cas des aciers.
   Revue de Métallurgie Juillet-Août 1980, pp. 773-783.

9. LIEURADE (H.P.). La résistance à la fatigue des assemblages soudés.
   Métaux Corrosion Industrie, n° 586, Juin 1974, pp. 1-24.