

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : **Génie Mécanique**

Spécialité : Assemblages Soudés et Matériaux

Par : **AMARA Fatima Zahra**

Thème

Prédiction du comportement en fatigue des joints soudés en présence des contraintes résiduelles

Soutenu publiquement, le 09/06/2024, devant le jury composé de

Président	:	KARA ALI Djamel	MCB	Université de Tlemcen
Encadreur	:	BENACHOUR Mustapha	Pr	Université de Tlemcen
Co-encadreur	:	SERIARI Fatima Zohra	Dr	Université de Tlemcen
Examineur	:	SEBAA Fethi	Pr	Université de Tlemcen

Année Universitaire 2023/2024

DÉDICACES

Je dédie ce travail à mes très chers parents pour tous les sacrifices consentis, pour leurs soutiens durant toutes mes années d'études.

A mes frères et sœurs

A ma famille

A tous mes proches

A tous mes amis

Ma reconnaissance est également formulée envers tous mes enseignants et toute l'équipe administrative du département de Génie Mécanique

Remerciements

*Toute la Gratitude, tout d'abord à Allah qui nous a donné la force
pour terminer ce travail.*

*Je remercie mes encadreur le professeur **BENACHOUR Mustapha**
et le docteur Mme **SERJARI Fatima Zohra** exerçant
au département de génie mécanique de l'université de Tlemcen
pour leur encadrement et leurs aides précieux et inestimables.*

*Mes remerciements vont aussi aux membres de jury qui n'ont fait
l'honneur d'accepter de juger mon travail.*

*Mes sincères reconnaissances à mes enseignants du département
de Génie mécanique de Tlemcen.*

*Enfin mes remerciements tous ceux qui ont contribué à la finalisation
de ce travail, qu'ils trouvent ici l'expression de mes profonds respects.*

Fatima Zahra

ABSTRACT

This study examines the effects of residual stresses due to welding on FCG through the fusion zone of welded low alloy steel ASTM grade steel A645 (5% Ni). Two types of specimens were studied, namely un-welded specimens and flat welded specimens where the crack for the latter is perpendicular to the longitudinal weld joint. The specimens were subjected to constant cyclic loading for “R” greater than zero. The effect of the stress ratio “R” is highlighted on welded and un-welded specimens. The results show that the fatigue life increases with the increase of the stress ratio and a weak effect is noted on the evolution of fatigue crack growth rates (FCGRs).

The residual stress distributions considered are a real profile and a linearized profile. The effects of residual stresses for a given stress ratio result in a reduction in fatigue life and FCGRs for a real profile, while for a linearized profile we note an increase in cracking speed compared to a real profile and an un-welded specimen. Really, the effects of residual stresses are translated to an effective stress ratio effect which depends on the distribution of residual stresses and results in an increase in fatigue crack growth rates. The prediction of fatigue crack growth is made using the application of the Nasgro model.

Key words: Fatigue, residual stress, fatigue crack growth, ASTM steel, stress ratio “R”

ملخص

هذه المذكرة تدرس تأثيرات الضغوط المتبقية الناتجة عن اللحام على انتشار شقوق الكلال عبر منطقة الاندماج لسبائك فولاذية منخفضة درجة ASTM فولاذ A645 (5% Ni). تمت دراسة نوعين من الأشكال الهندسية، وهي العينات غير الملحومة والنماذج الملحومة المسطحة حيث يكون الشق للأخيرة عمودياً على وصلة اللحام الطولية. تم تعريض العينات لتحميل ثابت السعة مع نسب تحميل موجبة R. تم تسليط الضوء على تأثير نسبة الحمل على العينات الملحومة وغير الملحومة.

أظهرت النتائج أن عمر الخدمة يزداد مع زيادة نسبة التحميل ولوحظ تأثير ضعيف على تطور سرعات التشقق

توزيعات الإجهاد المتبقية التي تم النظر فيها هي ملف تعريف حقيقي وملف تعريف خطي. تؤدي تأثيرات الضغوط المتبقية لنسبة حمل معينة إلى انخفاض في العمر الافتراضي وسرعة التشقق لملف جانبي حقيقي، بينما بالنسبة للملف الخطي نلاحظ زيادة في سرعة التكسير مقارنة بالمقطع الحقيقي والعينة غير الملحومة. في الواقع، تؤدي تأثيرات الإجهادات المتبقية إلى تأثير نسبة الحمل الفعالة التي تعتمد على توزيع الإجهادات المتبقية وتؤدي إلى زيادة سرعة التشقق. يتم التنبؤ بسلوك انتشار التصدع التعب باستخدام نموذج .Nasgro

الكلمات المفتاحية : التعب، الإجهاد المتبقي، انتشار شقوق التعب، صلب ASTM، نسبة التحميل

RÉSUMÉ

Le présent mémoire examine les effets des contraintes résiduelles dues au soudage sur le comportement en fatigue à travers la zone de fusion d'un acier faiblement allié ASTM grade Steel A645 (5% Ni). Deux types de géométries ont été étudiés à savoir des éprouvettes non soudées et des éprouvettes soudées plats où la fissure pour ces dernières est perpendiculaire au joint de soudure longitudinal. Les éprouvettes ont été soumises à des chargements cycliques pour un rapport "R" supérieur à zéro. L'effet de "R" est étudié sur des éprouvettes soudées et non soudées. Les résultats montrent que le nombre de cycles augmente avec l'augmentation de "R" et un faible effet est noté sur l'évolution de vitesses de fissuration.

Les distributions des contraintes résiduelles considérées sont un profil réel et un profil linéarisé. Les effets des contraintes résiduelles pour un "R" donné se traduisent par une diminution de la durée de vie et de la vitesse de fissuration pour un profil réel, alors que pour un profil linéarisé on constate que les vitesses de fissuration augmentent comparativement par rapport à un profil réel et une éprouvette non soudée. Réellement, les effets des contraintes résiduelles s'expliquent un effet de rapport de charge effectif qui est lié aux contraintes résiduelles. La prédiction du comportement en fatigue est faite à l'aide de l'application du modèle de Nasgro.

Mots clés: Fatigue, contraintes résiduelles, fissuration par fatigue, Acier ASTM, rapport "R"

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1

Figure 1.1 Paramètres de chargement cyclique d'amplitude constante.....	4
Figure 1.2: Domaines d'endurance en fatigue	5
Figure 1.3: Passage d'un stade cristallographique (stade 1) à un stade non cristallographique (stade 2).....	7
Figure 1.4: Variation de la vitesse de propagation en fonction du facteur d'intensité de contrainte	8
Figure 1.5: Fissurations possibles pour des soudures d'angle sous charge transversale.....	9
Figure 1.6: Domaine d'existence des contraintes d'ordre (∂I)	9
Figure 1.7: Domaine d'existence des contraintes (∂II)	10
Figure 1.8: Domaine d'existence des contraintes d'ordre (∂III)	10
Figure 1.9: Changements de la température et les contraintes durant l'opération de soudage	Error! Bookmark not defined.

CHAPITRE 2

Figure 2.1: Contrainte résiduelle longitudinale mesurée dans une plaque soudée	16
Figure 2.2 : Comparaison des vitesses de propagation (a) le long de la direction du joint de soudure, (b) perpendiculaire au joint de soudure	16
Figure 2.3 : Distribution des contraintes résiduelles dues au soudage	17
Figure 2.4 : Courbes de propagations des fissures de fatigue pour des joints soudés sous l'influence des paramètres (a) rapport de charge, (b) zone de fissuration, (c) différents types d'aciers, (d) procédés de soudage, (e) apport de chaleur	19
Figure 2.5: Eprouvette C(T) soudé par FSW	20
Figure 2.6 : Distribution des contraintes résiduelles dues au soudage par FSW [24, 25]	20
Figure 2.7 Effets des contraintes résiduelles sur la propagation des fissures de fatigue des joints 6013 FSW et métal de base	21
Figure 2.8: Joint cruciforme a) position du joint de soudure b) fissure perpendiculaire c) fissure transversale	22
Figure 2.9: Profil des contraintes résiduelles dans un joint cruciforme soudé par fsw (sens longitudinal et transversal)	22

Figure 2.10: Effets des contraintes résiduelles sur la résistance à la fatigue d'un joint soudé bout à bout.....	23
Figure 2.11: Courbes contraintes déformation pour différents types d'aciers Basé sur la norme d'essais de traction DINen 10 002z.....	23
Figure 2.12: Distribution des contraintes résiduelles pour les différents types d'aciers Soudés par TIG dans le sens (a) transversale (b) longitudinale.....	24
Figure 2.13: Relaxation des contraintes résiduelles transversales au niveau de l'axe De la soudure (à gauche) et au pied de la soudure (à droite) en fatigue cyclique élevée	24
Figure 2.14: Contraintes résiduelles générées après sept passes de soudage	25

CHAPITRE 3

Figure 3.1: Interface géométrie.....	Error! Bookmark not defined.
Figure 3.2 : Interface matériau	29
Figure 3.3: Interface chargement cyclique	29
Figure 3.4: Interface contraintes résiduelles	30
Figure 3.5: Modèle géométriques des éprouvettes soudées et non soudés	32

CHAPITRE 4

Figure 4.1: Effet du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue pour $\Delta\sigma=170\text{MPa}$	36
Figure 4. 2: Effet du rapport de charge sur la vitesse de fissuration pour $\Delta\sigma=170\text{MPa}$	36
Figure 4. 3: Effet de l'amplitude de chargement sur la durée de vie pour $R = 0.35$	37
Figure 4.4: Effet de l'amplitude de chargement sur la vitesse de fissuration pour $R = 0.35$...	38
Figure 4. 5: Effet de l'amplitude de chargement sur la vitesse de fissuration pour $R = 0.3$	39
Figure 4. 6: Formes et dimensions d'éprouvettes soudées longitudinalement	39
Figure 4.7: Effet du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue pour $\Delta\sigma=170\text{ MPa}$ en présence des contraintes résiduelles	40
Figure 4.8: Effet du rapport de charge sur la vitesse de fissuration pour $\Delta\sigma=170\text{MPa}$ en présence des contraintes résiduelles	41
Figure 4.9: Evolution de la vitesse de fissuration en fonction de "a" pour $\Delta\sigma=170\text{MPa}$ en présence des contraintes résiduelles	41
Figure 4.10: Evolution du rapport de charge effectif en fonction de "a" pour $\Delta\sigma=170\text{MPa}$ en présence des contraintes résiduelles à profil réel	42
Figure 4.11: Evolution du facteur d'intensité de contrainte dû aux contraintes résiduelles à profils réel et linéarisé	42

Figure 4.12: Effet du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue en présence des contraintes linéarisées d'un joint soudé bout à bout	44
Figure 4.13: Effet du rapport de charge et contraintes résiduelles linéarisées d'un joint soudé bout à bout.....	45
Figure 4.14: Effet du rapport de charge et contraintes résiduelles linéarisées d'un joint soudé bout à bout.....	45
Figure 4.15: Evolution du rapport de charge effectif en présence des contraintes résiduelles à profil linéarisé d'un joint soudé bout à bout	46
Figure 4.16: Effet des contraintes résiduelles à profil réel et linéarisé sur la durée de vie en fatigue d'un joint soudé bout à bout.....	47
Figure 4.17: Effet des contraintes résiduelles à profil réel et linéarisé sur la vitesse de fissuration d'un joint soudé bout à bout.....	48
Figure 4.18: Evolution du rapport de charge effectif en fonction de "a" en fonction des contraintes résiduelles à profil réel et linéarisé pour $R=0.35$	48

LISTE DES TABLEAUX

CHPITRE 1

Tableau 1.1: Différentes origines des contraintes résiduelles pour les opérations de mise en œuvre couramment utilisées dans l'industrie **Error! Bookmark not defined.**

CHAPITRE 3

Tableau 3.1. Composition chimique de l'acier A645 Gr 45	33
Tableau 3.2. Propriétés mécaniques de l'acier A645 Gr 45	33
Tableau 3.3 Paramètres du modèle de propagation Nasgro	33

LISTE DES ABREVIATION

Symbole	Désignation	Unité
$S_a = \sigma_a$	Demi-amplitude de contrainte	MPa
$\Delta S = \Delta \sigma$	Amplitude de contrainte	MPa
$S_m = \sigma_m$	Contrainte moyenne	MPa
$S_{Max} = \sigma_{Max}$	Contrainte maximale	MPa
σ_D	Limite d'endurance	MPa
C_{th}	Coefficient seuil	
a	Longueur de fissure	m
a_0	Longueur de fissure initiale	m
$R = \frac{S_{min}}{S_{Max}}$	Rapport de charge	
ΔK_I	Facteur d'intensité de contrainte	MPa.Sqrt(m)
ΔK_{th}	Amplitude du facteur d'intensité de contrainte seuil	MPa.Sqrt(m)
K_{IC}	Facteur d'intensité de contrainte critique	MPa.Sqrt(m)
FSW	Procédé de soudage friction-malaxage	
N	Nombre de cycles	Cycles
da/dN	Vitesse de fissuration	m/cycle
t	Epaisseur	mm
t_0	Epaisseur de référence (condition de déformation plane)	mm
K_{crit}	Facteur d'intensité de contrainte critique.	MPa.Sqrt(m)
ν	Coefficient de poisson	

S O M M A I R E

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE COMPORTEMENT EN FATIGUE ET CONTRAINTES RESIDUELLES ..	3
1. Généralités sur la fatigue	4
1.1. Définition	4
1.2. Comportement en fatigue : courbe de Wöhler.....	5
1.3. Mécanisme de fissuration par fatigue.....	6
1.3.1. Amorçage des fissures de fatigue.....	6
1.3.2. Propagation des fissures	6
1.3.1. Rupture finale.....	8
1.4. Fatigue d'éléments soudés.....	8
2. Contraintes résiduelles	9
2.1. Définition	9
2.2. Origine des contraintes résiduelles :	10
2.3. Déformations et contraintes induites par soudage	12
2.3.1. Contraintes résiduelles dans les assemblages soudés	12
2.4. Principe de génération des contraintes résiduelles lors de l'opération de soudage	12
 CHAPITRE II: Effets des contraintes résiduelles dues au soudage sur le comportement en fatigue	
Error! Bookmark not defined.	
1. Effet des contraintes résiduelles sur la propagation des fissures dans les joints soudés	15
2. Effet des contraintes résiduelles sur la résistance à la fatigue (endurance).....	22
 CHAPITRE III : Méthodologie de Prédiction& Données Expérimentales Error! Bookmark not defined.	
1. Introduction :	28
2. Code AFGROW	28
3. Description du modèle de prédiction Nasgro	31
4. Géométrie et matériau d'étude	32
4.1. Modèle géométrique.....	32
4.2. Matériau d'étude	33
 CHAPITRE IV: Resultats & Discussion.....	
1. Effet du rapport de charge	35
2. Effet de l'amplitude de chargement	37
3. Effet des contraintes résiduelles dues au soudage	38
3.1. Profil réel des contraintes résiduelles	38
3.2. Profil linéarisé des contraintes résiduelles.....	43
3.3. Etude comparative en présence des contraintes résiduelles réelles et linéarisées	46
Conclusion générale	49
Références.....	50

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les joints soudés sont présents dans de nombreuses structures industrielles et infrastructures critiques, jouant un rôle important dans la construction de ponts, de bâtiments, de pipelines, de navires et de nombreuses autres applications. Cependant, ces joints soudés sont souvent soumis à des conditions environnementales et à des charges mécaniques sévères qui peuvent entraîner des défaillances prématurées en raison des chargements cycliques (phénomène de fatigue).

En parallèle, les contraintes résiduelles σ_r de soudage représentent un autre aspect critique des joints soudés. Lors du processus de soudage, des contraintes locales se développent dans la zone affectée HAZ, résultant souvent en des distributions non uniformes de contraintes résiduelles à travers la structure soudée. Ces contraintes résiduelles peuvent influencer de manière significative la fatigue des joints soudés en modifiant les conditions locales de contraintes et en impactant l'amorçage et la propagation des fissures de fatigue.

Comprendre la croissance des fissures de fatigue est essentiel pour prédire la durée de vie de nombreuses structures soumises à une charge cyclique. Il s'agit de la durée de vie résiduelle de nombreuses structures affectées par une charge à la fatigue. Il est largement connu que la soudure est plus sensible à la défaillance par fatigue que le matériau de base en raison des problèmes liés à la présence d'inclusions, à la fusion incomplète, aux changements microstructuraux et à l'introduction des contraintes σ_r . Les études sur la fissuration par fatigue dans les soudures en acier produites par divers procédés de soudage ont montré en général que les contraintes σ_r sont principalement responsables de l'augmentation des vitesses de fissuration par fatigue s'ils sont de nature tensionnelle ou diminution s'ils sont compressifs comparativement au matériau de base. Il a été démontré que les vitesses de fissuration par fatigue dans les zones HAZ ainsi que dans la zone de fusion sont proches. Lors de la conception des structures soudées, le concepteur doit tenir compte des contraintes résiduelles qui seront incluses dans l'évaluation de l'amplitude du facteur d'intensité de contraintes.

Le but de ce mémoire est d'étudier l'influence des contraintes σ_r sur la fissuration en fatigue de joints soudé ainsi que le niveau de chargement cyclique.

Le manuscrit est composé de quatre chapitres :

Le 1^{er} chapitre fait l'objet d'une étude bibliographique sur la fatigue et les contraintes résiduelles σ_r .

Le 2^{ème} chapitre présente un état de l'art sur les effets des contraintes σ_r dues au soudage sur la fissuration par fatigue des joints soudés.

Le 3^{ème} chapitre présente la méthode de prédiction de la fissuration par fatigue sous l'environnement du code AFGROW ainsi que le matériau et la géométrie étudié.

Le 4^{ème} chapitre est consacré à la présentation des résultats et discussion de l'influence des contraintes σ_r dues au soudage sur le comportement en fatigue. Le mémoire est finalisé par une conclusion et des perspectives.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LE COMPORTEMENT EN FATIGUE ET CONTRAINTES RESIDUELLES

Les approches théoriques sur l'endommagement des matériaux par fatigue et l'impact des contraintes résiduelles principalement dues au soudage sur le comportement mécanique des assemblages soudés font l'objet de ce chapitre.

1. Généralités sur la fatigue

1.1. Définition

La fatigue est un mot anglais qui désigne le processus d'endommagement par des charges cycliques qui modifie les propriétés d'un matériau et peut entraîner la formation de fissures et éventuellement la rupture de la pièce. Le matériau peut se rompre pour des contraintes inférieures à la limite élastique. Les stades de fissuration par fatigue se résument à l'amorçage de fissures, la propagation et la rupture finale. Les paramètres influençant la fissuration et ainsi la durée de vie d'une pièce sont le niveau maximal du chargement cyclique, la rugosité de surface et l'environnement de service [1].

La figure 1 présente l'évolution d'un chargement cyclique à amplitude constante et les paramètres influents définissant ce chargement.

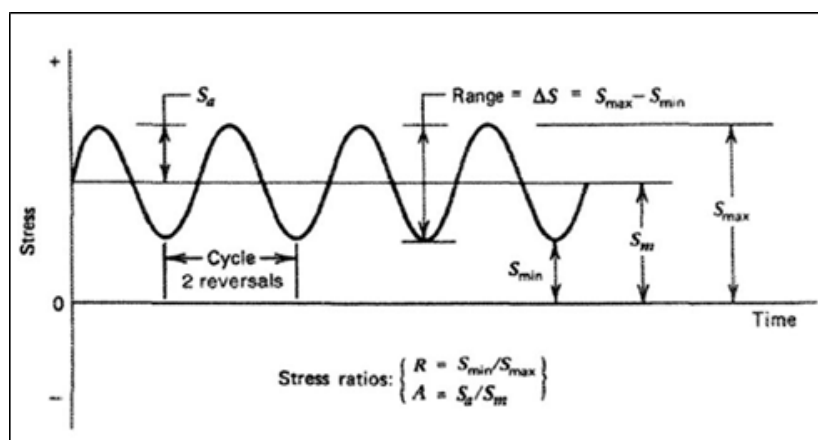


Figure 1.1 Paramètres de chargement cyclique à d'amplitude constante

S_a : Demi-amplitude de contrainte

ΔS : Amplitude de contrainte

S_m : Contrainte moyenne

S_{Max} : Contrainte maximale

S_{min} : Contrainte minimale

$R = \frac{S_{min}}{S_{Max}}$: Rapport de charge

1.2. Comportement en fatigue : courbe d'endurance de Wöhler

Les simples essais de fatigue consistent à exposer un certains nombres d'éprouvettes lisses ou entaillées et tenant compte du contrôle de l'état de surface. Les chargements cycliques appliqués, sont caractérisés principalement par l'amplitude $\Delta\sigma$ ou $\Delta\sigma_a$. On détermine alors le nombre de cycles jusqu'à rupture n_f . A chaque échantillon est lié un point du plan (σ , N) ou courbe (S-N). Sous la variation de la contrainte « σ » pour chaque éprouvette, on obtient une courbe dont l'allure générale est présentée sur la figure i.2. Cette courbe appelée diagramme de Wöhler [2, 3] est définie par trois domaine qui sont décrit sur la figure I.2. La courbe de Wöhler est d'un emploi courant pour estimer le degré d'endommagement lié aux chargements cycliques (fatigue) des matériaux appliquées dans différents industries mécaniques et autres[4].

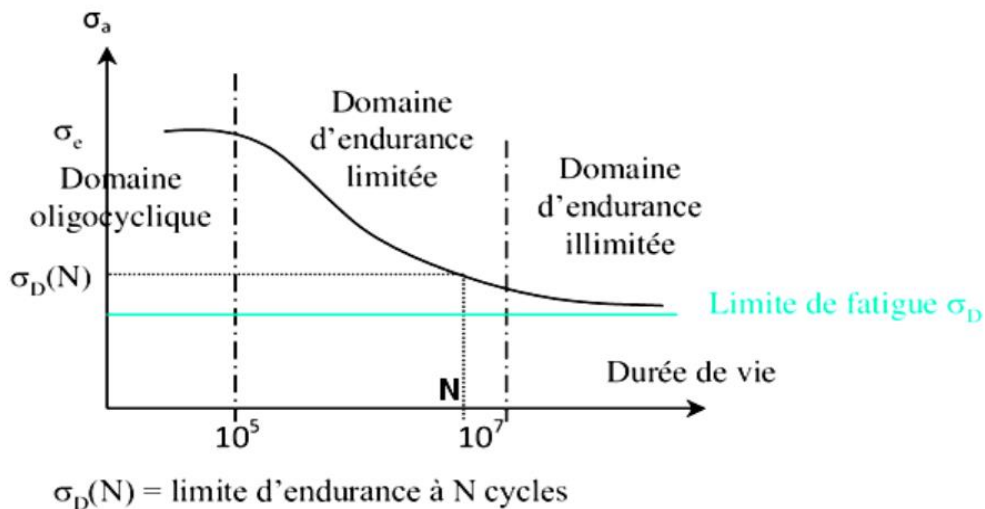


Figure 1.2: domaines d'endurance en fatigue [3]

- **Domaine à déformation plastique:** $10^3 < N < 10^5$ cycles : On note est une déformation plastique importante à la pointe de la fissure avec un nombre de cyclique très réduit.
- **Domaine à endurance limitée:** $10^4 < N < 10^7$: Dans ce cas on est en présence de déformation élastique avec une réduction de l'amplitude de chargement et une augmentation du nombre de cycle.
- **Domaine d'endurance illimité :** $N > 10^7$ cycles : caractérisé par une contrainte inférieure à la limite d'endurance

1.3.Mécanisme de fissuration

Il existe divers stades d'endommagement par fatigue où les défauts peuvent se générer et se résument aux points suivant :

- Changements microstructuraux qui génèrent un dommage irréversible.
- Présence des microfissures.
- Croissance et la coalescence des défauts microscopiques conduisant à des fissures principales.
- Evolution stable d'une fissure principale
- Rupture
- L'examen des surfaces de rupture fait ressortir généralement 03 zones :
- Un site d'amorçage
- Une zone de propagation stable
- Un faciès de rupture [4]

1.3.1. Amorçage des fissures de fatigue

L'observation d'une éprouvette soumise à un chargement cyclique montre que l'endommagement apparaît essentiellement à la surface (modification superficielle en cours d'essai). L'observation au microscope optique met en évidence, lors des premiers cycles de chargement, l'apparition de bandes de glissement ou de déformation. Ces bandes se multiplient au cours du chargement, mais surtout se renforcent et résistent à un traitement thermique de restauration. Il faut polir l'éprouvette pour les faire disparaître. L'endommagement du matériau est irréversible après un certain nombre de cycles. L'amorçage est essentiellement un phénomène superficiel. Il convient donc de vérifier la qualité des usinages des pièces ou de procéder au besoin à des traitements mécanique superficiels comme le grenaillage ou la trempe superficiel, pour optimiser la tenue en fatigue [4].

1.3.2. Propagation des fissures

On distingue deux stades dans la phase de propagation des fissures. Nous les nommerons le stade 1 et le stade 2 (figure 1.3).

- **Stade 1** : Les microfissures suivent les plans de glissement cristallographiques les mieux orientés. La propagation est ainsi contrôlée par la cession maximale résolue. La vitesse de croissances de i 'ordre de quelques angströms par cycle. La

transition du stade i au stade ii se produit quand la fissure se propage perpendiculairement à la direction de traction.

- **Stade 2:** la caractéristique principale du stade ii est l'apparition de stries de fatigue. On assiste à un adoucissement plus avancé de la fissure. La fissure s'ouvre et se referme, mais, dû aux phénomènes irréversibles de glissement, elle ne retrouve pas sa position initiale [5].

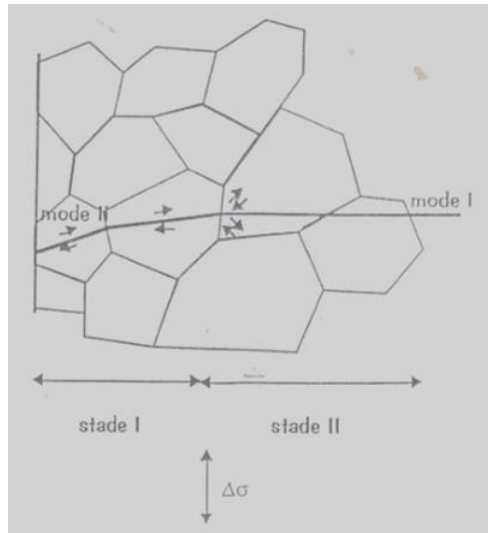


Figure 1. 3: passage d'un stade cristallographique (stade 1) à un stade non cristallographique (stade 2).

La vitesse de propagation de la fissure peut être divisée en 03 zones distinctes (figure 1.4). Dans la zone I, la variation du FIC (ΔK_I) n'atteint pas le seuil critique (Δk_{th}), ce qui signifie que bien que la fissure soit initiée. La propagation de la fissure se produit dans les zones II et III. La zone III présente une vitesse exponentielle qui conduit rapidement à la rupture. Dans la zone II, la vitesse de propagation peut être considérée comme constante à l'échelle logarithmique. Ce taux de propagation est décrit par la loi de paris :

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_I)^m \quad (1)$$

La vitesse de propagation d'une fissure peut varier en fonction d'autres facteurs qui ne sont pas pris en compte dans le modèle de paris, tels que le rapport de charge "R" [6, 7]. Cet effet peut être négligé dans la zone II, D'autres lois empiriques sur la base de la loi de paris ont été proposées dans différents travaux [8, 9] afin de prendre en compte ce facteur.

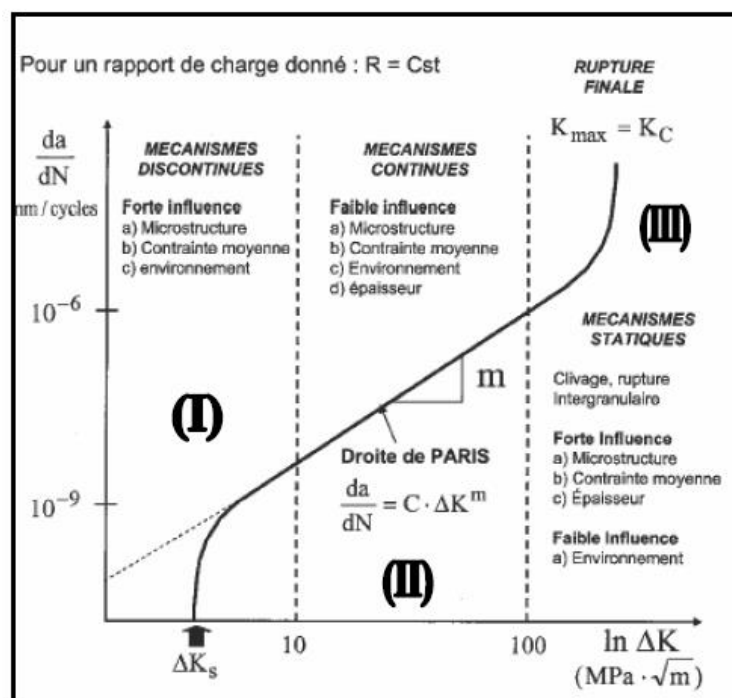


Figure 1. 4: Evolution de la vitesse da/dN en fonction du facteur d'intensité de contraintes [10]

1.3.1. Rupture finale

Au stade III, nous assistons à une rupture instable car la matière restante ne suffit plus à transmettre l'effort. Le critère de rupture instable ou finale est défini le facteur d'intensité de contrainte critique K_{IC} .

1.4. Fatigue d'éléments soudés

La résistance à la fatigue d'un élément dépend de nombreux facteurs, tels que des propriétés mécaniques, chargements moyens et les surcharges occasionnelles. Cependant, pour un élément soudé, le bon comportement en fatigue est lié aux contraintes résiduelles et à la qualité de la soudure. Le soudage introduit deux états supplémentaires à considérer lors de l'analyse de la résistance à la fatigue comparativement aux éprouvettes lisses. Le figure I.5 présente les lieux préférentiels pour la fissuration à savoir le pied du cordon et la racine du cordon de soudure [11].

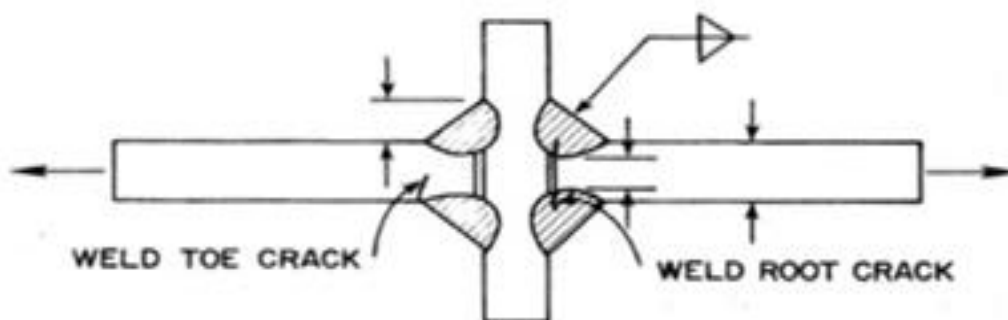


Figure 1.5 : Lieux de fissurations dans les joints d'angles [11]

2. Contraintes résiduelles

2.1. Définition

Les contraintes résiduelles sont les contraintes présentes dans un matériau après sa fabrication, sans l'influence de forces externes ou de gradients thermiques. Ces contraintes sont souvent causées par des déformations plastiques ou des variations de volume durant le processus de fabrication ou traitements thermiques. Les méthodes expérimentales fiables sont nécessaires pour évaluer les contraintes σ_r et comprendre leur niveau d'information. Les contraintes résiduelles sont classées en trois catégories distinctes [11, 12].

Premier ordre : les contraintes résiduelles du premier ordre sont homogènes, et se créent au comme le montrent la figure 1.6. Les contraintes résiduelles du premier ordre sont également traitées en mécanique des milieux continus [13].



Figure 1.6 : Domaine d'existence des contraintes d'ordre ($0I$) [13]

Deuxième ordre : les contraintes σ_r du deuxième ordre sont homogènes à l'échelle d'un grain ou d'une portion de grain pour les matériaux monophasés (c'est-à-dire à une échelle de quelques dizaines de micromètres), comme illustré dans la figure I.7.

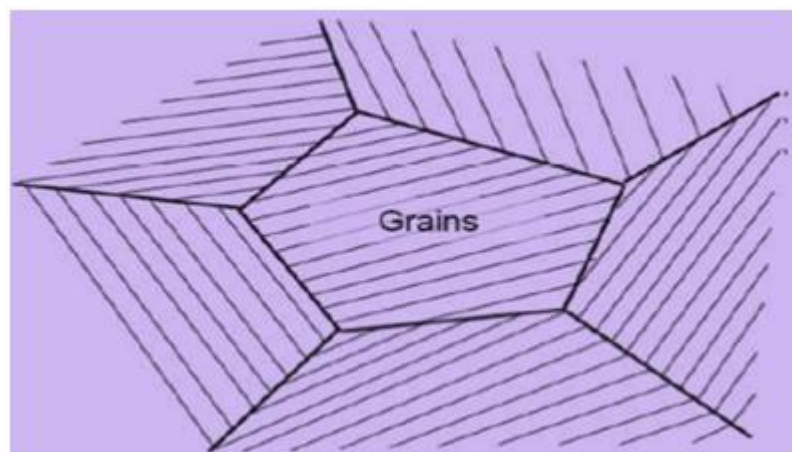


Figure 1.7 : Domaine d'existence des contraintes (σ_{ii}) [13]

Troisième ordre : les contraintes σ_r d'ordre 3 (σ_{III}) sont hétérogènes. Elles sont principalement associées aux déformations présentes au niveau des défauts cristallins. Ces contraintes sont appelées contraintes microscopiques hétérogènes. La figure 1.8 donne une schématisation des contraintes σ_r d'ordre 3 [13].

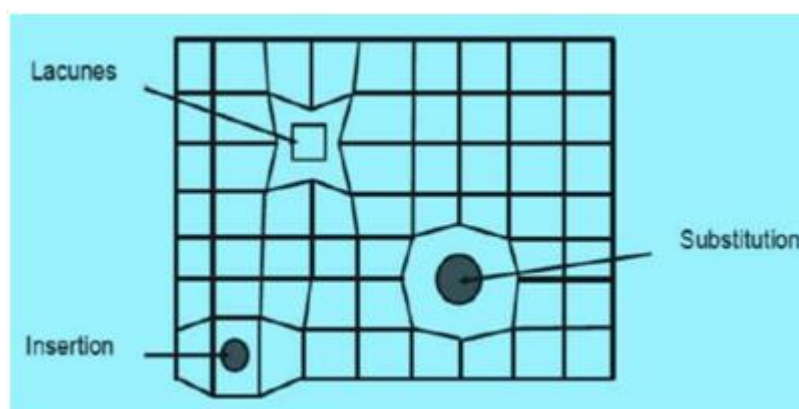


Figure 1.8 : Domaine d'existence des contraintes d'ordre (σ_{III}) [13]

2.2. Origine des contraintes résiduelles :

Les procédés de fabrication génèrent des contraintes résiduelles liées à des facteurs mécaniques, thermiques et/ou métallurgiques. L'auteur, Withers, illustre ces origines à travers plusieurs exemples, synthétisés dans le tableau 1.1. Le focus est ensuite mis sur les contraintes résiduelles engendrées par le processus de soudage, découlant principalement de la contrainte mécanique due à la fixation de la pièce, de la contrainte thermique causée par la source thermique du soudage, et de la contrainte métallurgique provoquée par les variations de température altérant la structure du matériau.

Tableau 1. 1: Différentes origines des contraintes résiduelles pour les opérations de mise en œuvre couramment utilisées dans l'industrie [13]

Procédé	Origine mécaniques	Origine thermique	Origine structurale
fonderie(moulage)	Non	gradient de température pendant la refroidissement	changement de phase
traitement de surface mécanique et mise en forme à froid (grenaillage, martelage, forgeage, redressage, filage)	déformation plastique hétérogène entre le cœur et la surface de la pièce	non	possible dans certains cas
Usinage (rectification, tournage, fraisage, perçage, alésage)	Déformation plastique due à l'enlèvement de copeaux	Gradient de température du à l'échauffement pendant l'usinage	Transformation de phase pendant l'usinage si la température est suffisamment élevée
Trempe sans transformation de phase	Non	Gradient de température	Non
Trempe superficielle avec transformation de phase (induction, Fe, laser, plasma méthodes classiques)	Non	Gradient de température	Changement de volume du à la transformation de phase
Cémentation (nitruration)	Non	Incompatibilité thermique	Nouvelle composant chimique avec variation de volume
Soudage	Bridage	gradient de température	Modification microstructurale (ZAT)
brasage	Incompatibilité mécanique	Incompatibilité thermique	Nouvelle phase à l'interface
Dépôt électrolytique	Incompatibilité mécanique	Incompatibilité thermique	Composition de dépôt selon les bains
Projection à chaude (plasma, laser, jet kote)	Incompatibilité mécanique, microfissuration	Incompatibilité thermique, gradient de température	changement de phase de dépôt

2.3. Déformations et contraintes induites par soudage

2.3.1. Contraintes dans les assemblages soudés

Les assemblages soudés présentent des contraintes résiduelles, qui peuvent être de nature tensionnelle ou compressive. Ces contraintes peuvent avoir des effets néfastes sur la sécurité de l'assemblage soudé. Il existe quatre types de contraintes résiduelles possibles :

a. **Contraintes résiduelles directes** : sont causées par les déformations de retrait et bloquées dans le joint soudé. Elles ne touchent que la zone proche du cordon de soudure, et leur présence est inévitable. Ces contraintes générées sont dues à la répartition non uniforme du flux thermique dans l'assemblage soudé.

b. **Contraintes résiduelles indirectes, ou de bridage** : résultent de l'opposition du bridage de l'ensemble soudé aux dilatations et aux retraites. Contrairement aux contraintes résiduelles directes, ces contraintes affectent uniformément chaque élément de l'ensemble soudé. Elles sont donc réparties sur une plus grande étendue que les contraintes résiduelles directes.

c. **Contraintes parasites (extérieures à l'opération de soudage)** : sont des contraintes extérieures au processus de soudage qui s'exercent sur le joint soudé durant l'opération de soudage. Un exemple de contrainte parasite est la charge en porte-à-faux exercée par la masse de l'ensemble soudé pendant le soudage. Cependant, il est possible de réduire considérablement, voire d'éliminer complètement, ces contraintes parasites en prenant les mesures appropriées

d. **Contraintes résiduelles dans les assemblages bout à bout** : les assemblages bout à bout présentent des contraintes résiduelles directes longitudinales, qui peuvent atteindre la limite d'élasticité du matériau à une distance de six fois le métal fondu. Après le soudage, le joint est tendu dans le sens longitudinal, y compris dans le cordon de soudure et ses abords [14, 15].

2.4. Principe de génération des contraintes résiduelles lors de l'opération de soudage

La figure 1.9 est une représentation du changement de température (δt) et effort dans la direction de soudure pendant le soudage. Différentes sections Dans les zones régions loin de la source de chaleur, les efforts sont compressifs (σ_x est négatif). Lorsque la section d-d est à côté de la source de chaleur, la distribution d'effort ne change pas de manière importante, et cette distribution est définie comme étant la distribution des contraintes résiduelles [16].

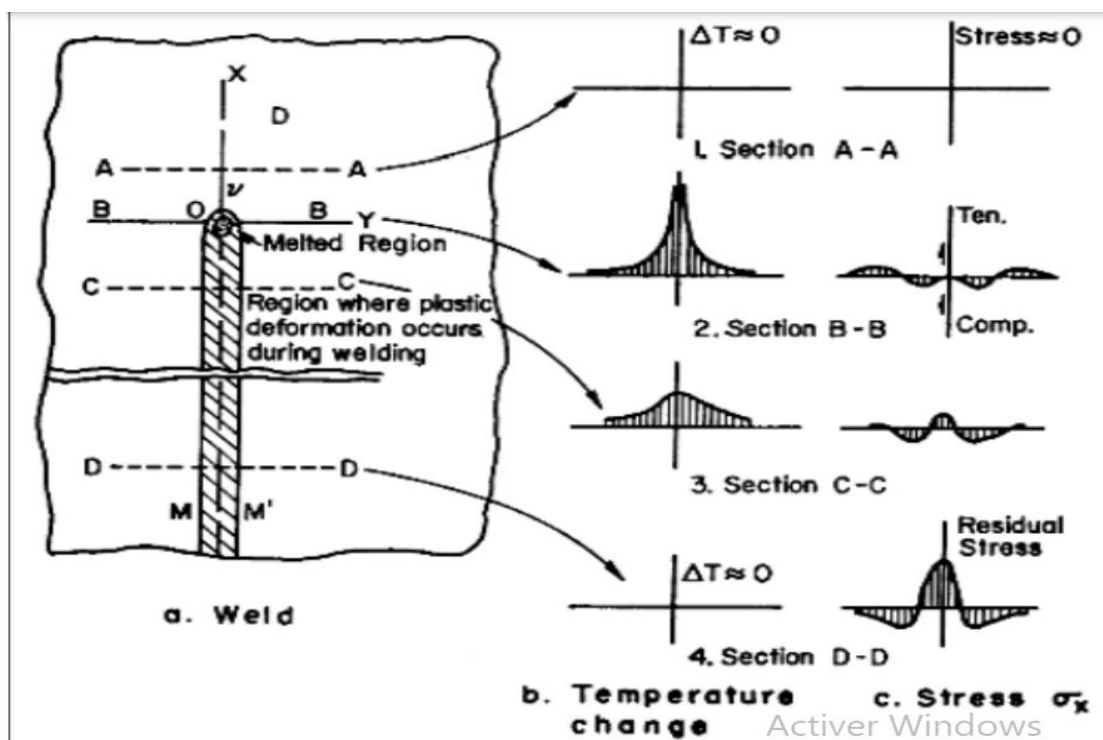


Figure 1. 9: Changements de la température et les contraintes pendant l'opération de soudage [16]

CHAPITRE II:

**Effets des contraintes résiduelles dues
au soudage sur le comportement en fatigue**

Il est crucial de comprendre la distribution et l'évolution des contraintes résiduelles σ_r dans les joints soudés pour obtenir une conception précise et optimale en fatigue des composants des structures pour différents matériaux afin d'améliorer la résistance ultime à la fatigue. Des études expérimentales de joints soudés traitant les effets des contraintes σ_r ont été effectués par plusieurs chercheurs en considérant différents types de matériaux avec des qualités diverses, dimensions géométriques et types de soudures [17-21]. Ce chapitre présente l'état de l'art sur les effets des contraintes σ_r dues au soudage sur le comportement en fatigue des joints soudés.

1. Contraintes résiduelles et propagation des fissures dans les joints soudés

L'effet des contraintes résiduelles dans le sens transversal et le sens longitudinal sur la propagation des fissures de fatigue de l'alliage d'aluminium 2219 T851 a été étudié par Galatolo et Lanciotti [22]. La distribution des contraintes σ_r dans le sens longitudinal est donnée par la figure 2.1. La figure 2.2 montre les résultats des vitesses de propagation dans la zone de fusion et la zone HAZ sur deux types d'éprouvettes à savoir éprouvette c(t) et éprouvette ct(t) dans le sens du soudage (figure 2.2a) et sens perpendiculaire à la soudure (figure 2.2b). La différence principale réside dans la distribution des contraintes résiduelles. Pour les contraintes dans le cas des fissures se propageant dans le sens du soudage, les contraintes résiduelles appliquées dans la direction perpendiculaire à la fissure sont très faibles. Dans le cas des fissures se propageant perpendiculairement au joint de soudure, les vitesses de fissuration pour l'éprouvette C(T) sont très faibles par rapport aux vitesses de fissuration de l'éprouvette cc(t) (figure 2.2b).

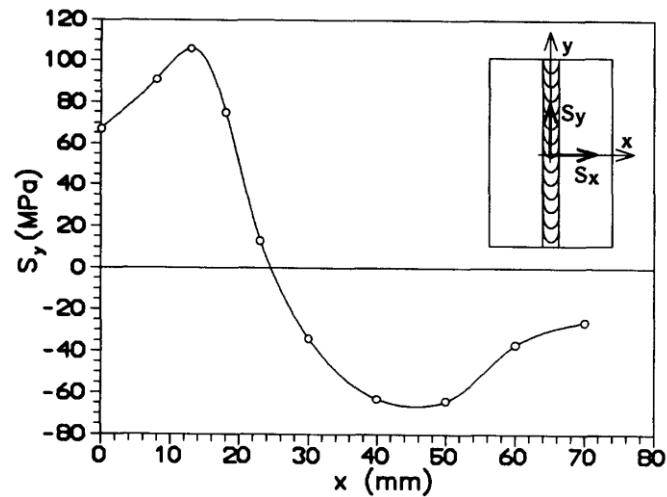


Figure 2. 1: Contrainte résiduelle longitudinale mesurée dans une plaque soudée [22]

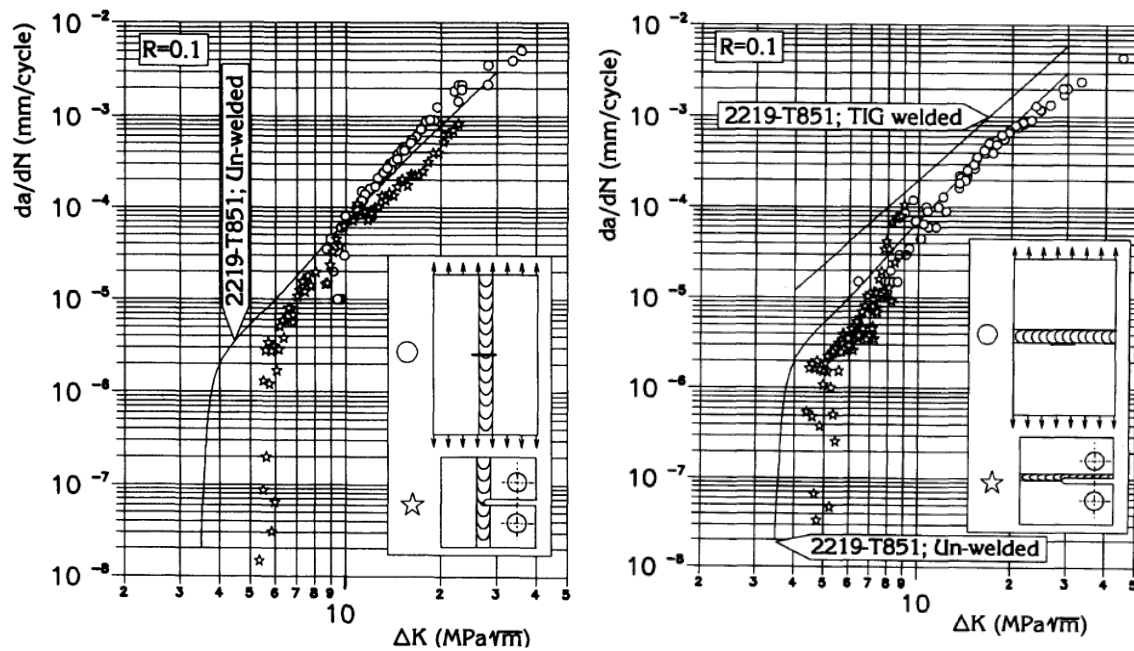


Figure 2. 2: Comparaison des vitesses de propagation (a) le long de la direction du joint de soudure, (b) perpendiculaire au joint de soudure [22]

Le seuil de non fissuration en fatigue et les propriétés des régions à vitesse de propagation élevées ont été étudiés sur plusieurs types de joints soudés par Ohta et al. [23]. La forme des distributions des contraintes résiduelles induite sont données schématiquement par la figure 2.3 dans le sens longitudinale. L'effet du rapport de charge sur la fissuration d'un joint soudé a été investigué sachant que les contraintes résiduelles de tension ont été prises en compte (figure 2.4a). La différence dans la zone de propagation des fissures de fatigue (métal fondu et zone affectée thermiquement) dans les joints tels que soudés ne présentent aucune

variation sur l'évolution des vitesses de propagation (figure 2.4b). L'influence des paramètres (changements de la nature des aciers, méthode de soudage et le flux thermique) n'ont aucune influence sur les vitesses de propagation des joints de soudure (figures 2.4c, 2.4d et 2. 3e). Il a été constaté des résultats cités ci-dessus que les propriétés de propagation des fissures de fatigue des joints soudés ne changent pas malgré le changement de la microstructure et les propriétés mécaniques [23].

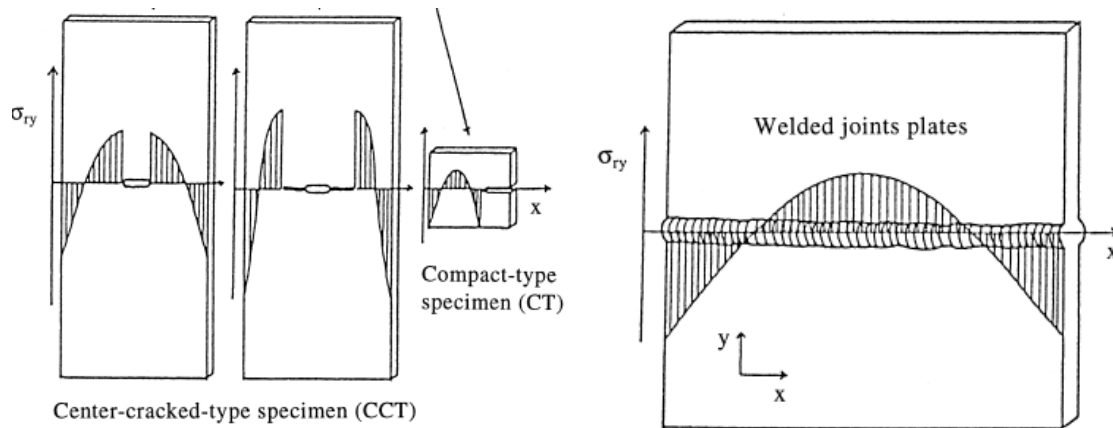
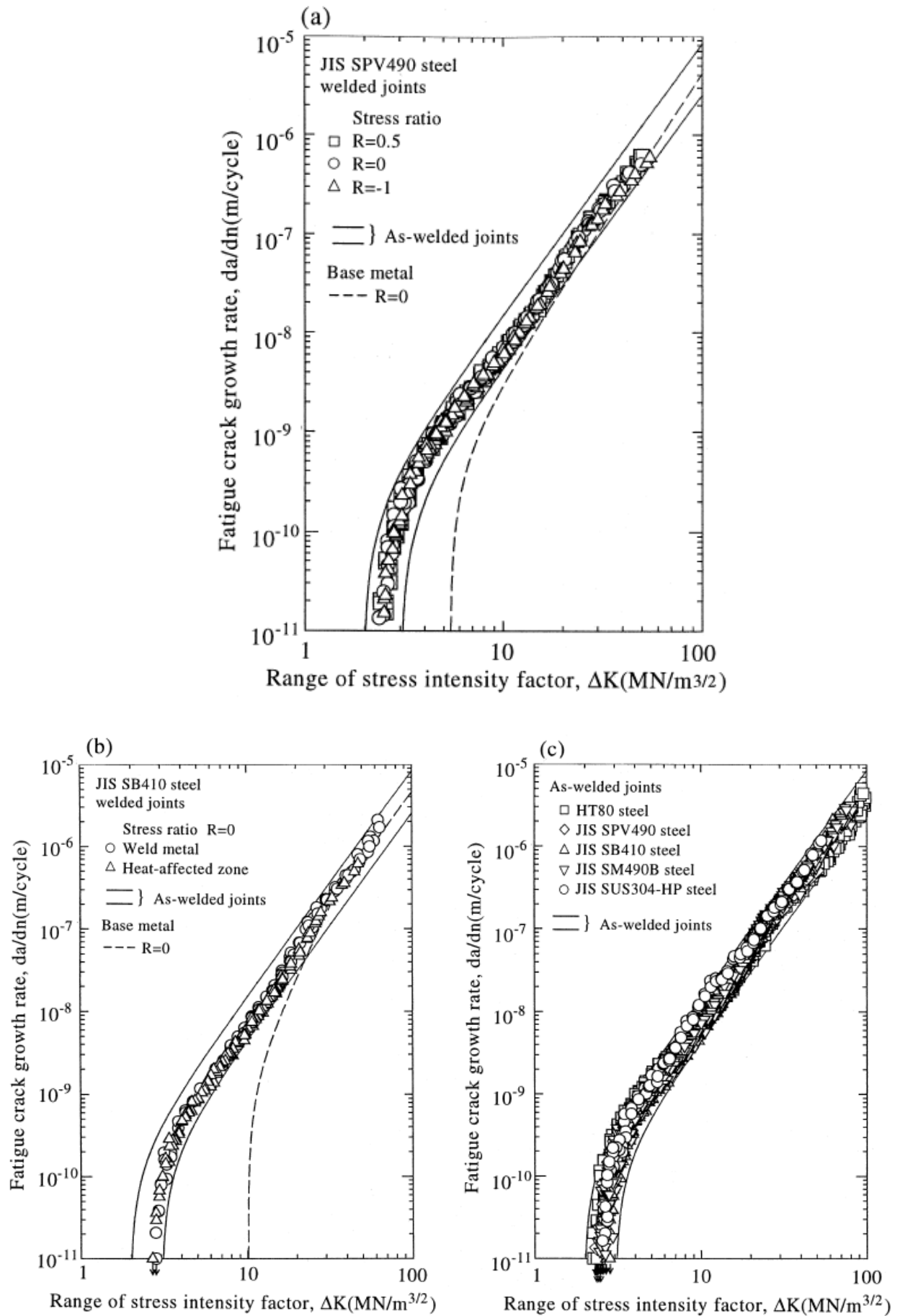


Figure 2. 3: Distribution des contraintes résiduelles dues au soudage [23]



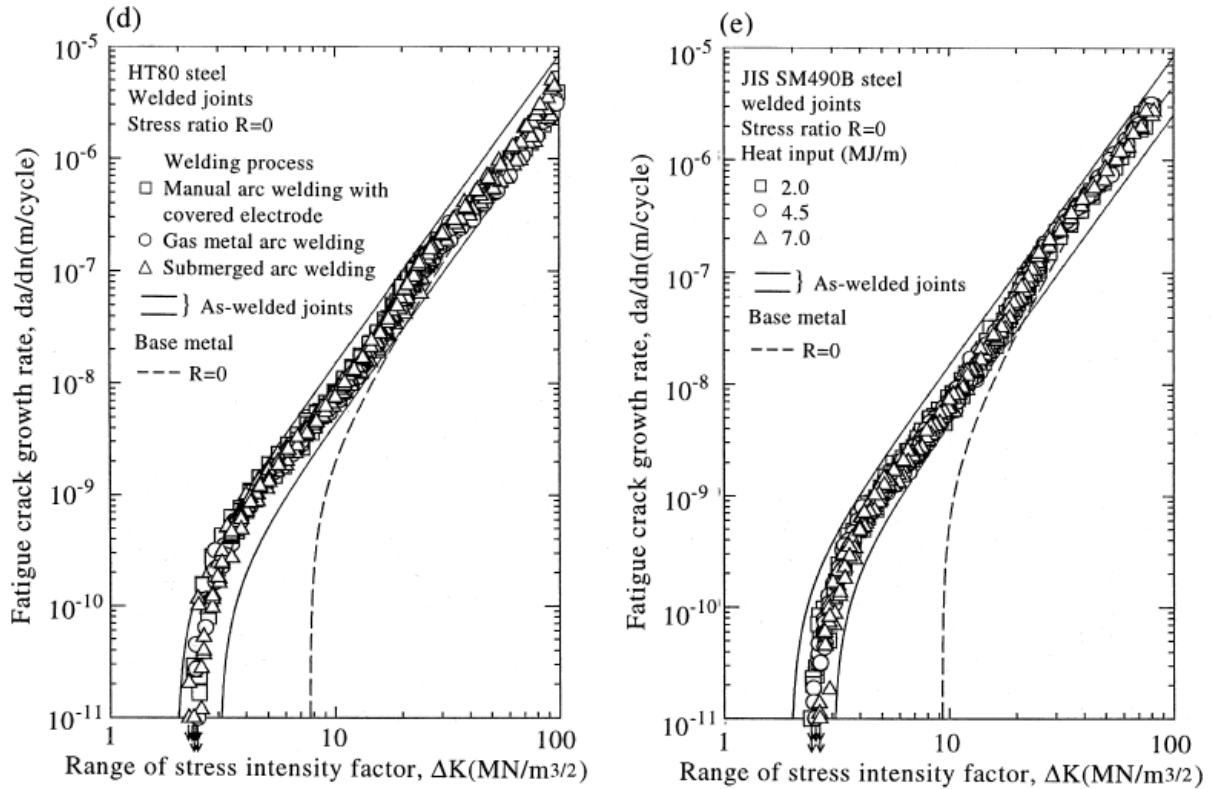


Figure 2. 4 : Courbes de propagations des fissures de fatigue pour des joints soudés sous l'influence des paramètres (a) rapport de charge, (b) zone de fissuration, (c) différents types d'aciers, (d) procédés de soudage, (e) apport de chaleur [23]

Baillias [24] a étudié l'influence des contraintes résiduelles dues au soudage par friction malaxage sur l'alliage d'aluminium 6013 ainsi que l'effet du rapport de charge. Une éprouvette C(T) a été utilisée pour conduire les essais de fatigue. La redistribution des contraintes résiduelles est sous la forme donnée par la figure 2.5. L'effet combiné des contraintes résiduelles et du rapport sur la propagation des fissures de fatigue des joints soudés et métal de base est donnée par la figure 2.6. Les vitesses mesurées dans le joint de soudure à $R=0.1$ sont inférieures comparativement par rapport à celles du métal de base. Le meilleur comportement de la propagation des fissures des joints FSW est associé à des contraintes résiduelles compressives en avant du fond de fissure, ce qui réduit le rapport r . Pour des chargements élevés, l'effet des contraintes résiduelles diminue à cause de l'augmentation de la longueur de la fissure et la redistribution des contraintes résiduelles. La figure 2.7 présente une étude comparative entre les vitesses de propagation du métal de base pour différents rapport de charge et celle des vitesses de propagation du joint soudé pour les mêmes rapports de charge.

L'effet des contraintes résiduelles est plus significatif pour les faibles rapports de charges comparativement par rapport aux rapports de charge élevés où les effets des contraintes résiduelles est réduit par l'augmentation du rapport de charge. Pour un ΔK supérieur à $13\text{MPa(m)}^{1/2}$, l'effet des contraintes résiduelles est éliminé. Par contre pour $R=0.8$, aucun effet des contraintes résiduelles n'est détecté.

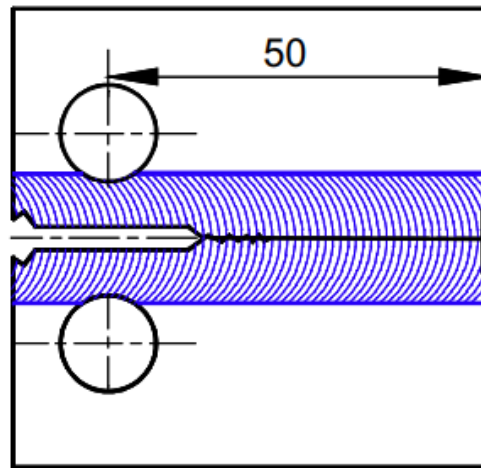


Figure 2. 5: Epreuve C(T) soudé par FSW [24]

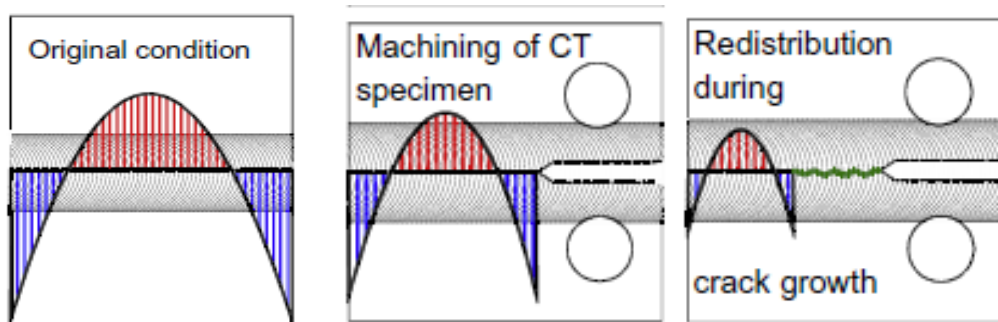


Figure 2. 6: Distribution des contraintes résiduelles dues au soudage par FSW [24, 25]

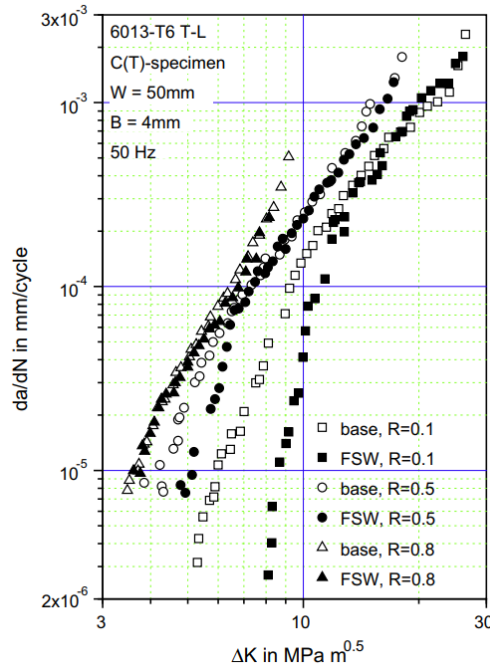


Figure 2. 7: Effets des contraintes résiduelles sur la propagation des fissures de fatigue des joints 6013 FSW et métal de base [24, 26]

Récemment, **Zhang et al. [27]** ont étudié l'effet des contraintes résiduelles d'un joint soudé par friction-malaxage (FSW) sur la propagation des fissures courtes sous un chargement bi-axiale d'un joint soudé en alliage d'aluminium 7075 t6. Un joint cruciforme est utilisé pour conduire des essais de soudage et de fatigue (figure 2.8a). La distribution des contraintes résiduelles est donnée par la figure 2.9 dans le sens longitudinale et transversale et montre un maximum de 45MPa et un minimum de -50MPa dans le sens longitudinal. Par contre, dans le sens transversal, la valeur maximale et minimale des contraintes résiduelles sont respectivement de 20MPa et -40MPa. Les résultats expérimentaux montrent que la fissure se développe directement dans la zone du métal de base de l'échantillon cruciforme BM et l'échantillon cruciforme de la zone soudé par FSW en considérant une fissure perpendiculaire à la soudure (figure 2.8b). Les contraintes résiduelles ont un faible effet sur le chemin de la fissuration. Pour une fissure parallèle au joint de soudure (figure 2.8c), le chemin de fissuration change avec la présence des contraintes résiduelles. Pour l'échantillon cruciforme FSW avec fissure parallèle à la soudure, un chemin de fissure en forme de s est présenté, la contrainte résiduelle modifie le chemin de fissure de fatigue bi-axial c.à.d. L'évolution de la longueur de fissure en fonction du facteur d'intensité de contrainte.

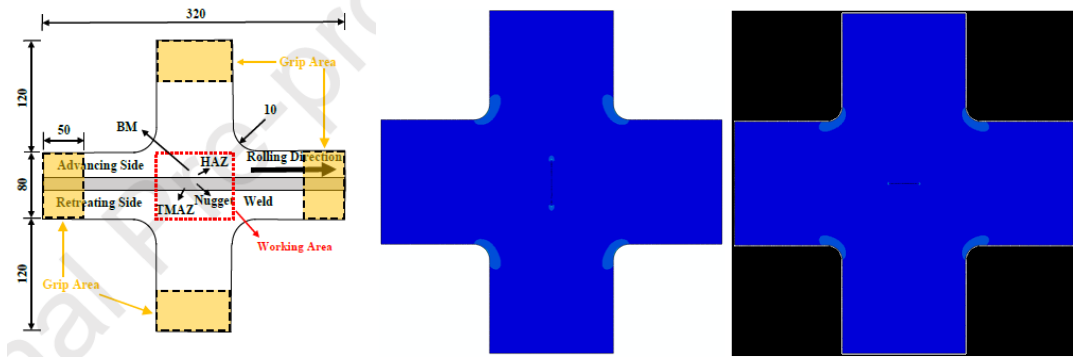


Figure 2. 8 :Joint cruciforme a) position du joint de soudure b) fissure perpendiculaire c) fissure transversale

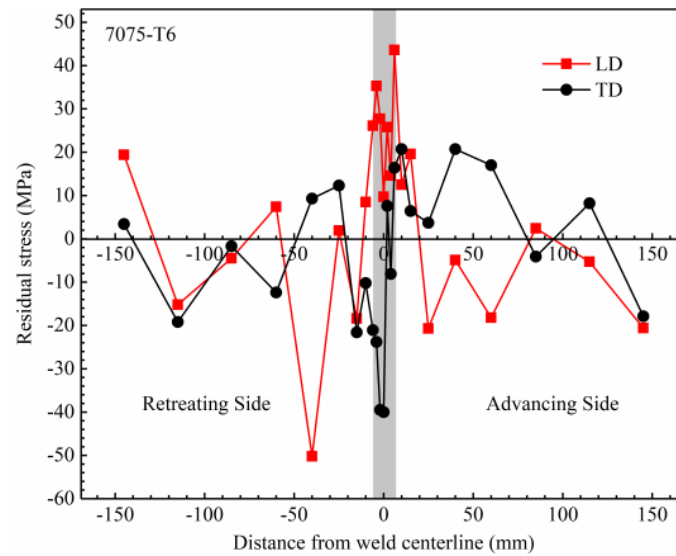


Figure 2. 9 : Profil des contraintes résiduelles dans un joint cruciforme soudé par FSW (sens longitudinal et transversal) [27]

2. Effet des contraintes résiduelles sur la résistance à la fatigue (endurance)

Dans leur études, Nguyen et Waheb [28] ont développés un modèle mathématique afin de prédire l'influence des paramètres géométriques du joint de soudure (rayon du pied du cordon de soudure, défaut de dépouille le long du joint de soudure, angle de flanc, épaisseur de plaque, désalignement) et la présence des contraintes résiduelles sur la résistance à la fatigue et la durée de vie en fatigue sous un chargement combiné en traction et flexion. L'effet des contraintes résiduelles dans les joints de soudure bout à bout a été investigué. La résistance à la fatigue est améliorée par la présence des contraintes résiduelles de compression et réduite par la présence des contraintes résiduelles de tension (figure 2.10). Ce constat est

cohérence avec les résultats des travaux similaires anciens et actuels reportés par plusieurs chercheurs [28-33].

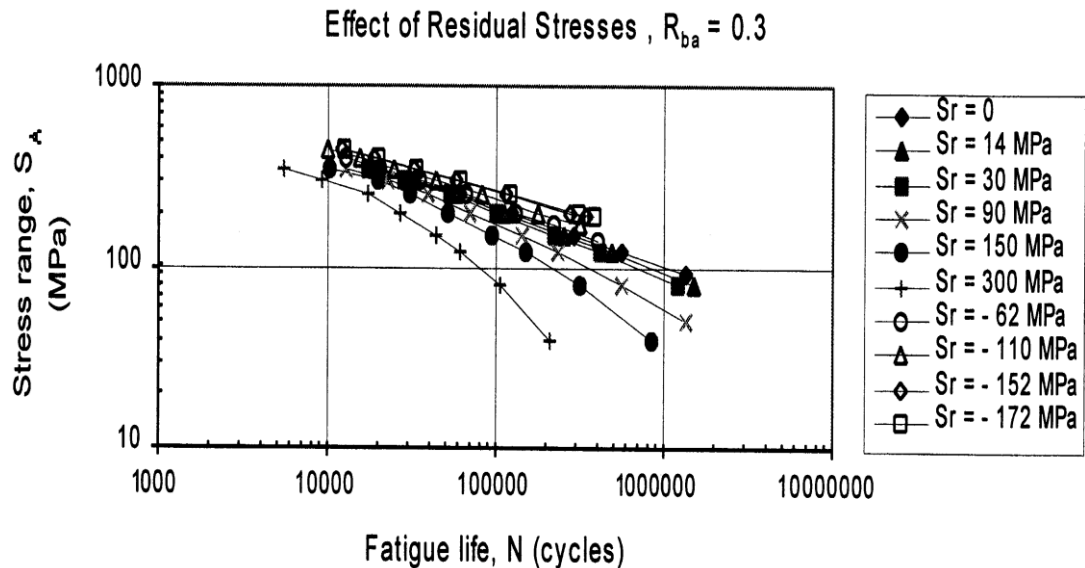


Figure 2. 10.: Effets des contraintes résiduelles sur la résistance à la fatigue d'un joint soudé bout à bout [28]

Dans son étude, Farajian [34] a investigué l'évolution des contraintes résiduelles pour différents types d'aciers à limite d'élasticité variable allant de 300 à 1200MPa (figure 2.11) soudé par le procédé de soudage TIG en position bout à bout. Les distributions des contraintes résiduelles dans le sens longitudinales et le sens transversales sont données par la figure 2.12. En début des essais de fatigue des relaxations des contraintes résiduelles ont été observées au milieu de la zone de fusion et au pied du cordon de soudure, après quelques cycles, aucune relaxation des contraintes n'a été remarquée (figure 2.13).

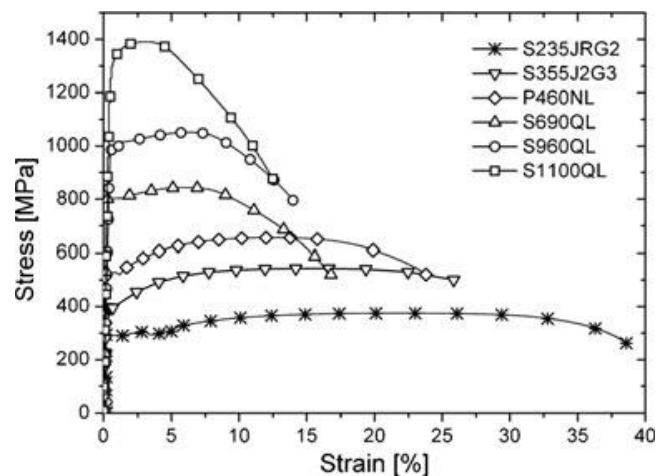


Figure 2. 11: Courbes contraintes déformation pour différents types d'aciers Basé sur la norme d'essais de traction DIN en 10 002z [34]

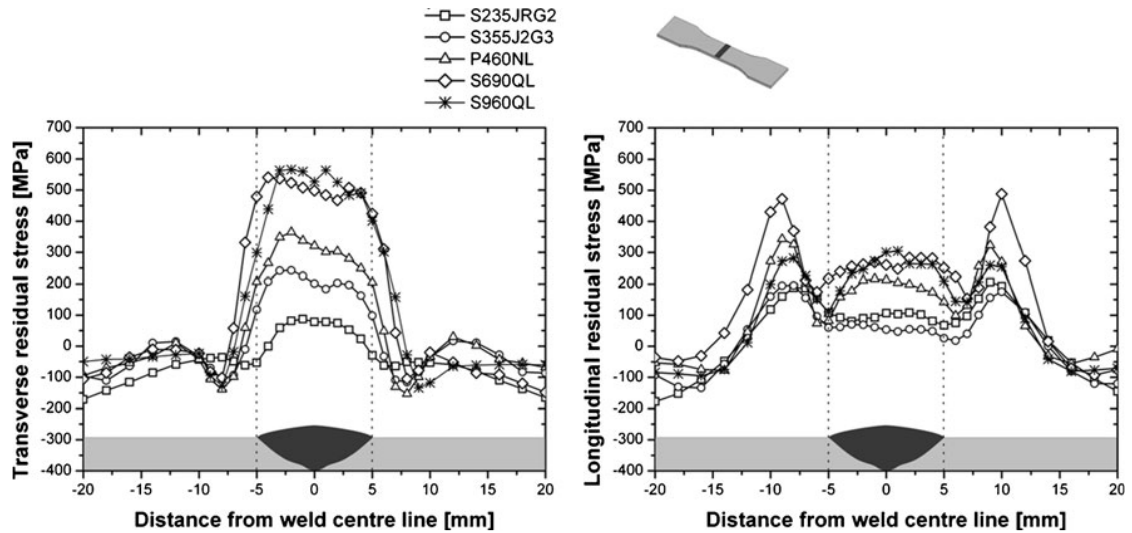


Figure 2.12 : Distribution des contraintes résiduelles pour les différents types d'aciers Soudés par TIG dans le sens (a) transversale (b) longitudinale [34]

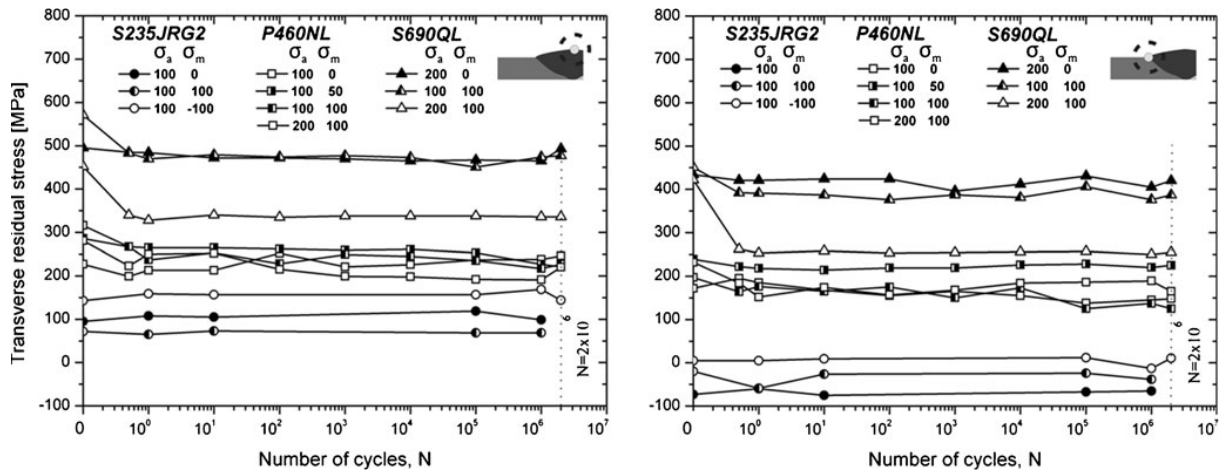


Figure 2.13 : Relaxation des contraintes résiduelles transversales au niveau de l'axe de la soudure (à gauche) et au pied de la soudure (à droite) en fatigue cyclique élevée [34]

En présence des contraintes résiduelles, les essais de fatigue ne sont souvent pas effectués aux à des rapports de charge nominal prévus, mais à des rapports de charge effectifs (inconnus). Cependant, **Hansel et al. [35]** ont démontré que la résistance à la fatigue est fonction des contraintes moyennes effectives lorsque les contraintes résiduelles et le rapport de charge sont toutes deux pris en compte.

Récemment, des investigations expérimentales et numériques pour évaluer les contraintes résiduelles de soudage en surface et dans l'épaisseur et leur relaxation dans les plaques soudées bout à bout en acier 316l sous l'action d'effort de fatigue ont été conduites par **Wang et Qian [36]**. Les contraintes résiduelles et leurs relaxations n'influent pas sur l'amplitude de contrainte du chargement cyclique appliquée mais affect le rapport de charge.

Le rapport de charge augmente avec la présence des contraintes résiduelles dues au soudage suivi d'une diminution due à la relaxation des contraintes résiduelles, de plus le rapport de charge dans les deux cas est supérieur au rapport de charge initial appliqué.

Dns le cas de soudage multi-passes **Wang et Qian [36]** ont montré que les contraintes résiduelles de tension apparaissent au alentour de la zone de fusion et devient compressive loin de la zone de fusion (figure 2.14). La température de soudage générée et les contraintes résiduelles augmentent avec l'augmentation du nombre de passes de soudage.

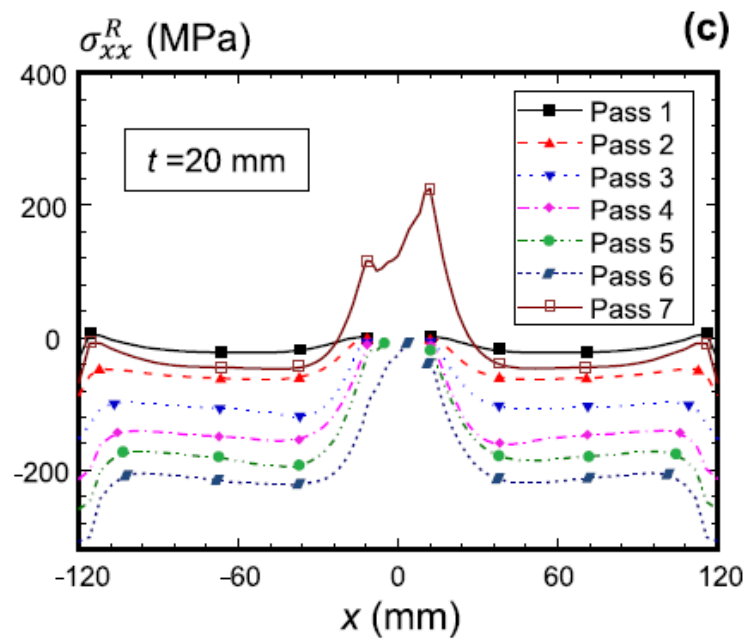


Figure 2.14: Contraintes résiduelles générées après sept passes de soudage [36]

Résumé

La revue de littérature présentée a fait l'objet de la présentation et synthèse des effets des contraintes résiduelles due au processus de soudage sur la durée vie en fatigue (comportement cyclique et propagation des fissures de fatigue), les résultats obtenus par ses chercheurs montre que :

- * La vitesse de propagation est affectée par la variation du rapport de charge et l'effet d'échelle des éprouvettes utilisées.
- * Les contraintes résiduelles générées par le processus de soudage ont conduit à l'augmentation de la vitesse de propagation vue leur nature tensionnelle importante principalement dans le sens longitudinal par rapport au sens transversal.
- * Les assemblages de soudage par FSW présentent de faibles niveaux des contraintes résiduelles par rapport aux autres procédés à arcs d'où un niveau de vitesses de propagation réduit.
- * Les contraintes résiduelles sont de nature tensionnelle au niveau de la zone de fusion et la zone affectée thermiquement et de nature compressive loin de la zone de fusion.
- * Durant la phase de propagation des fissures, les contraintes résiduelles se relaxent avec l'augmentation de la longueur de la fissure et leurs niveaux diminuent.
- * Les vitesses de propagation des fissures de fatigue sont réduites lorsque la fissure se propage dans le sens perpendiculaires au joint de soudure.

CHAPITRE III :

Méthodologie de Prédiction & Données Expérimentales

1. Introduction :

Dans ce chapitre, la méthode de prédiction de la fissuration par fatigue est présentée tenant compte des paramètres de chargement, nature du matériau, la géométrie appliquée et la présence des contraintes résiduelles sous l'environnement du code AFGROW [37].

2. Code AFGROW [37]

AFGROW est un code de calcul appliqué à la prédiction de la durée de vie en fatigue et les vitesses de propagation sous l'effet des paramètres de chargement et contraintes résiduelles " σ_r " dues au soudage. Ce code a été développé par haret au profit de la Nasa en 1987 en se basant sur des données matérielles expérimentales.

L'interface "modèle géométrique" (figure 3.1) et l'interface « matériaux » (figure 3.2) sont les interfaces principales. Il permet d'introduire les chargements cycliques à amplitudes constantes ou à amplitudes variables (figure 3.3) par interface chargement. Ce code a la possibilité d'introduire des matériaux différents. Les résultats de sortie sont sous forme de tableau de données numérique principalement de la variation de longueur de la fissure en fonction du nombre de cycle $a=f(N)$ et de la vitesse de propagation $da/dN=f(\Delta k)$.

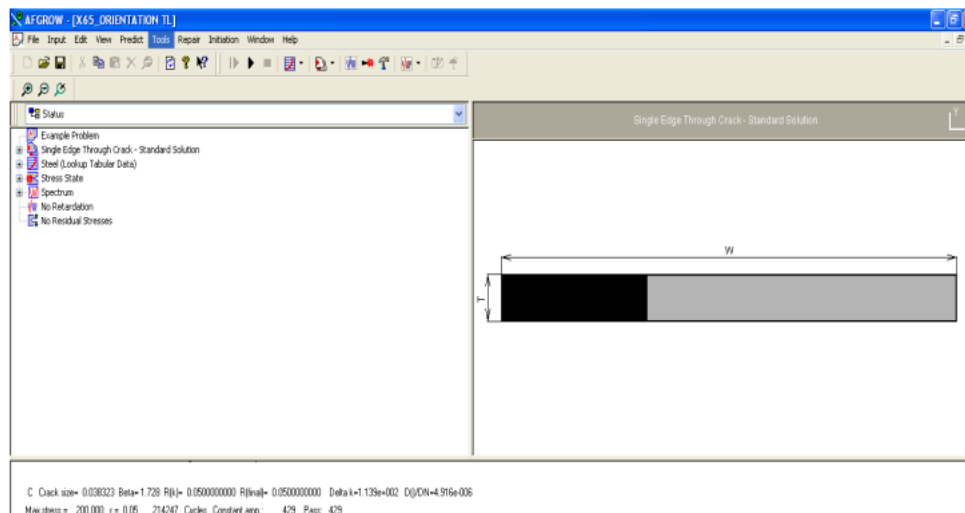


Figure 3. 1: Interface géométrie [37]

Tabular LOOKUP Data

Input values of Delta_K for up to 30 da/dN values and up to 10 different R(stress ratio) values. Matrix must have at least two R values and two da/dN values.
Input Delta_K for $R \geq 0$, input Kmax for $R < 0.0$

Number of da/dN Sets: 9 Number of R Sets: 4

		R[1]	R[2]	R[3]	R[4]
		0.05	0.4	0.7	0.9
da/dN[1]	2.90e-010	6.6	4.4	3.18	2.73
da/dN[2]	5.88e-010	6.7	4.5	3.4	3.3
da/dN[3]	1.00e-009	7.5	5	4.3	4.1
da/dN[4]	6.76e-009	8.1	6.3	5.4	5.1
da/dN[5]	8.73e-009	10	8.1	7.1	6.8

Material name: Pipeline_X70

Ultimate Strength: 672.9 Young's Modulus: 200000

Coefficient of Thermal Expansion: 1.19e-005 Poisson's Ratio: 0.3

Upper limit on da/dN, DADNHI: 1e-007 Lower limit on da/dN, DADNLO: 1e-010

Plane Stress Fracture Toughness, KIC: 125 Yield Strength, YLD: 527.4

Plane Strain Fracture Toughness, KIC: 98.896 Lower limit on R shift (Max: 0): 0

Delta K threshold value @R=0: 7.2 Upper limit on R shift (0, 1): 0.9

OK Cancel Save Read Apply

Figure 3.2 Interface matériau [37]

Spectrum

Stress Multiplication Factor (SMF) multiplies the stress or load levels found in spectrum files. This allows normalized spectra to be used. If actual stress levels are used in the spectrum files, SMF should be set to 1.

Residual Strength Requirement (Pxx) is used for critical crack size determination - if a value other than zero is entered.

Pxx - value of stress (or load for models using load instead of stress input) which the structure MUST be able to carry at all crack sizes.

Enter

Stress Multiplication Factor(SMF): 200

Residual Strength Requirement (Pxx): 0

Select

☐ Create new spectrum file

☐ Open spectrum file

☒ Constant amplitude loading

OK Cancel

Figure 3.3: Interface chargement cyclique [37]

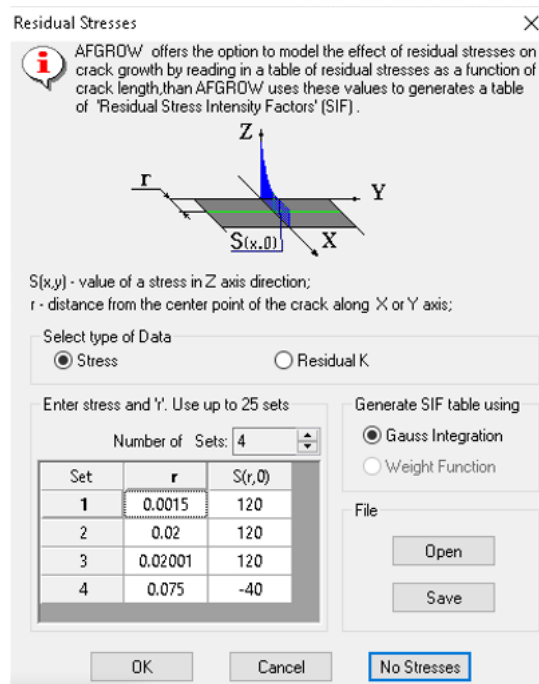


Figure 3.1: Interface contraintes résiduelles [37]

3. Description du modèle de prédiction

Le modèle de propagation Nasgro utilisé pour la prédiction de la vitesse de fissuration décrit les trois zones de la courbe de propagation [38]. L'équation de Nasgro est écrite sous la forme suivante :

$$\frac{da}{dN} = C [((1 - f)/(1 - R)) \cdot \Delta K]^m \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K}\right)^p}{\left(1 - \frac{\Delta K_{max}}{\Delta K_{crit}}\right)^q} \quad (1)$$

C, m, p, q des paramètres empiriques de l'équation de Nasgro.

"f" représente l'effet de fermeture de fissure :

$$f = \frac{K_{op}}{K_{max}} = \begin{cases} \text{Max}(R, A_0 + A_1 R + A_2 R^2 + A_3 R^3) & R \geq 0 \\ A_0 + A_1 R & -2 \leq R < 0 \\ A_0 - 2A_1 & R < -2 \end{cases} \quad (2)$$

Les coefficients ai sont données par :

$$A_i = \begin{cases} A_0(0,825 - 0,34\alpha + 0,05\alpha^2) \left[\cos\left(\frac{\pi}{2} \sigma_{max}/\sigma_0\right) \right]^{\frac{1}{\alpha}} \\ A_1 = (0,415 - 0,071\alpha) \sigma_{max}/\sigma_0 \\ A_2 = 1 - A_0 - A_1 - A_3 \\ A_3 = 2A_0 + A_1 - A_3 \end{cases} \quad (3)$$

A: rapport de contrainte/déformation plane

Σ_{max}/σ_0 : Rapport de la contrainte maximale appliquée sur la contrainte d'écoulement

ΔK_{th} : Amplitude du facteur d'intensité de contrainte seuil donnée par :

$$\Delta K_{th} = \Delta k_0 \left(\frac{a}{a+a_0} \right)^{\frac{1}{2}} / \left(\frac{1-f}{(1-A_0)(1-R)} \right)^{(1+C_{th}R)} \quad (4)$$

Δk_0 : amplitude du facteur d'intensité de contrainte seuil à r = 0

A : longueur de la fissure

A_0 : longueur de la fissure initiale

C_{th} : coefficient seuil

Les valeurs de Δk_0 et C_{th} sont données par les bases de données matérielles

L'effet d'épaisseur est inclut dans le modèle et dépend du rapport K_{crit}/K_{IC} donné par:

$$\frac{K_{crit}}{K_{IC}} = 1 + B_K e^{-\left(A_K \frac{t}{t_0}\right)} \quad (5)$$

K_{IC} : Ténacité du matériau

A_K, b_k : paramètres d'ajustement

T : épaisseur

T_0 : épaisseur de référence (condition de déformation plane)

La condition de déformation plane est définie par :

$$t_0 = 2,5(K_{IC}/\sigma_e)^2 \quad (6)$$

4. Géométrie et matériau d'étude

4.1. Modèle géométrique

Le modèle géométrique pour prédire la fissuration par fatigue est donné par la figure 3.5 avec une épaisseur de 4 mm incorporé dans le code AFGROW avec deux fissures émanant d'un trou de diamètre 3 mm usiné au niveau de la ligne de fusion dans le cas de la pièce soudée. La fissure initiale est de 16 mm à droite et à gauche du trou.

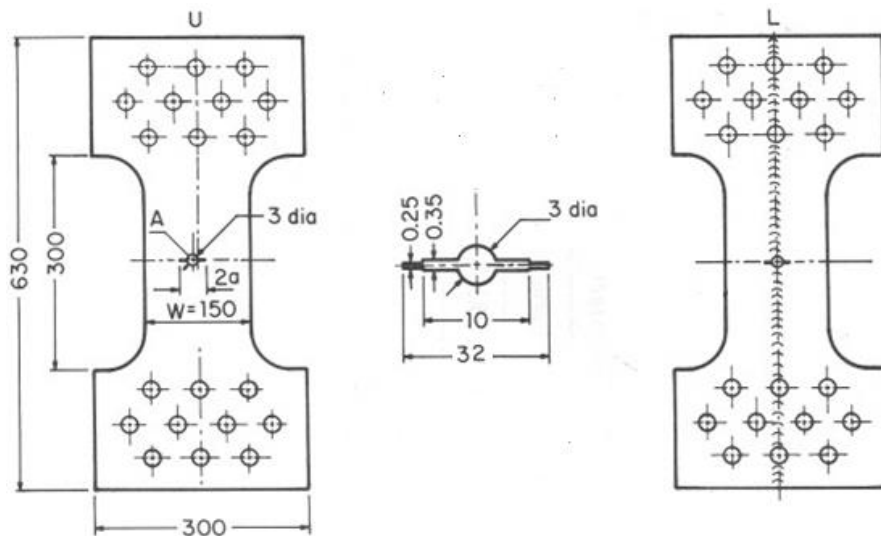


Figure 3. 2: Modèle géométriques des éprouvettes soudées et non soudées

4.2. Matériau d'étude

Le matériau utilisé dans cette étude est l'acier ASTM A645 Gr 45 similaire à l'acier 18G2AV de norme polonaise. La composition chimique et les propriétés mécaniques sont données respectivement par les tableaux 3.1 et 3.2. Les paramètres du modèle de propagation utilisé par Nasgro sont résumés au tableau 3.3.

Tableau 3. 1. Composition chimique de l'acier A645 Gr 45

C	Mn	Si	Ni	Mo	Al
0.13 max	0.3-0.6	0.2-0.35	5-5.25	0.2-0.35	0.02-0.12

Tableau 3. 2. Propriétés mécanique de l'acier A645 Gr 45

E (GPa)	σ_y (MPa)	Uts (MPa)	K_{ic} (MPa.sqrt(m))	K_c (MPa.sqrt(m))	ν
206	517.11	795	197.79	296.69	0.3

Tableau 3.3 Paramètres du modèle de propagation Nasgro

C	M	P	Q	ΔK_{th} à R=0
3.41×10^{-11}	2.5	0.25	0.25	5.49

CHAPITRE IV

Résultats & Discussion

1. Effet du rapport de charge "R"

L'effet du rapport "R" sur le nombre de cycles "N" et la vitesse da/dN est montré respectivement par les figures 4.1 et 4.2. En effet l'augmentation du rapport de charge pour un chargement cyclique maximal constant ($\sigma_{max} = 170\text{MPa}$) permet de croître le nombre de cycle "N". La longueur de fissure maximale sous l'effet du rapport de charge varie de 43.5 à 45mm. Ce croisement en nombre de cycle est en effet due à l'augmentation de l'amplitude de chargement et la taille de la zone plastique sous la variation du rapport de charge. Ce constat a été déjà approuvé expérimentalement par les travaux de Benachour et al. [39]. Le nombre de cycle (durée de vie) de fatigue passe de 78000 cycles pour $R = 0.1$ à 209000 cycles pour $R = 0.5$.

D'après la figure 4.2, on constate un accroissement de la vitesse de fissuration par la variation du rapport "R" dans le domaine de la propagation stable (domaine de Paris [40]). De plus on note une réduction du facteur d'intensité de contrainte ΔK avec l'augmentation du rapport "R" d'où la réduction du facteur d'intensité de contrainte seuil ΔK_{th} . Cet effet a été constaté dans l'étude menée par Glinka et al. [41] sur la propagation des fissures dans les joints de soudure bout à bout de l'acier 18g2av similaire à notre acier d'étude. A $\Delta K = 40 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$, la vitesse da/dN pour $R = 0.1$ est de $1.85 \times 10^{-7} \text{ m/cycle}$ par contre pour $R = 0.5$, la vitesse est de $3.27 \times 10^{-7} \text{ m/cycle}$ ce qui représente un taux d'augmentation de la vitesse de 77%.

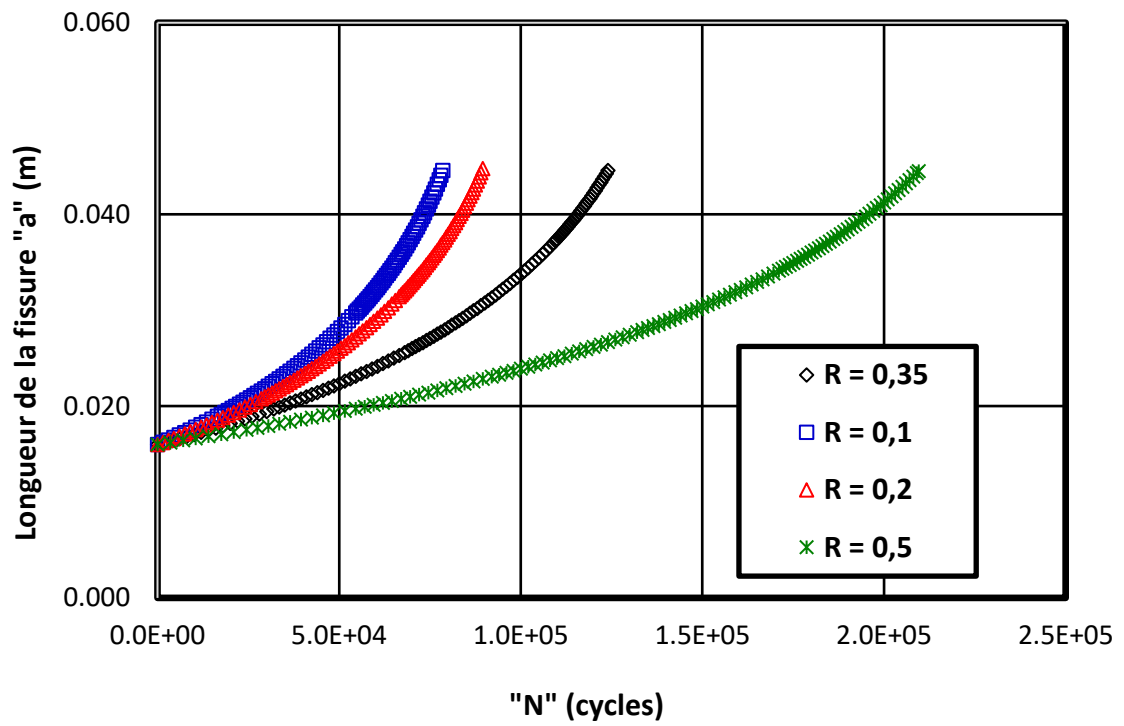


Figure 4.1 : Effet du rapport "R" sur le nombre de cycles en fatigue pour $\Delta\sigma=170\text{MPa}$

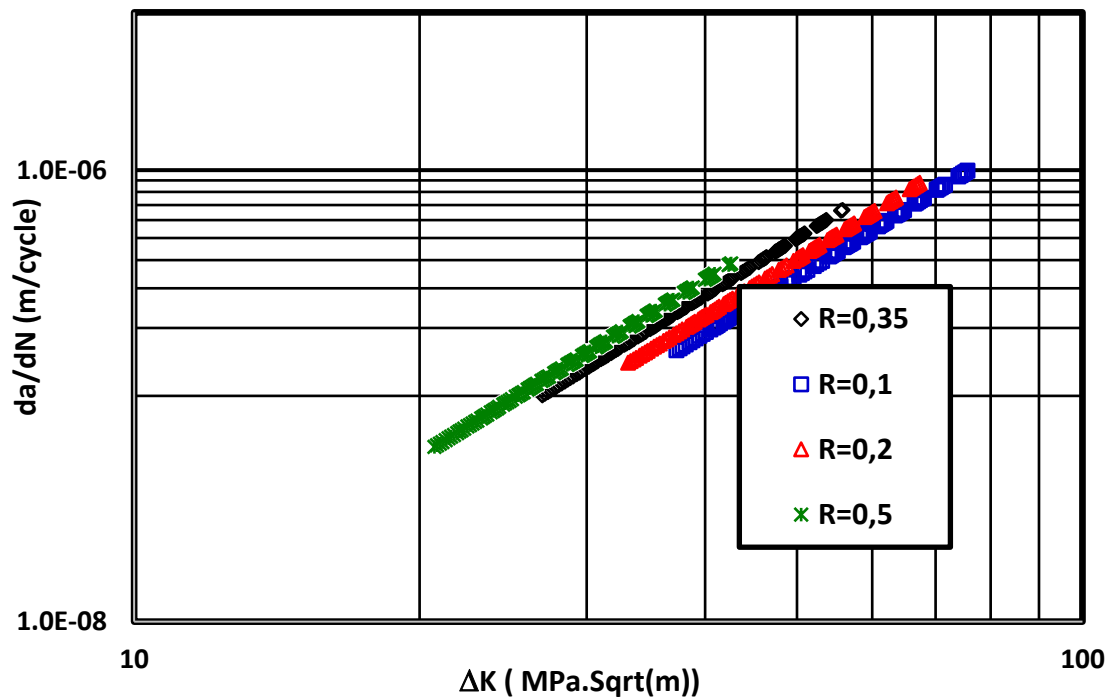


Figure 4.2 : Effet du rapport "R" sur la vitesse de fissuration pour $\Delta\sigma=170\text{MPa}$

2. Effet de l'amplitude de chargement

Afin de montrer les effets de l'amplitude de chargement cycliques, des courbes de durée de vie en fatigue sont tracées en fonction de la longueur de la fissure. La figure 3 présente l'évolution des courbes $a = f(N)$ pour $R = 0,35$ avec $\Delta\sigma_{\max}$ variant de 100 à 170 MPa. On note que pour un rapport "R" fixe, le nombre de cycles en fatigue est affecté par l'amplitude de chargement. L'accroissement du nombre de cycles est constaté avec la diminution de l'amplitude de chargement. La longueur finale des fissures est réduite avec l'augmentation de l'amplitude de chargement cyclique, elle passe de 56.16 mm à 43.37 mm respectivement pour $\Delta\sigma_{\max}$ égale à 100MPa et 170MPa.

L'évolution de la vitesse " da/dN " en fonction de la longueur de la fissure est donnée par la figure 4.4 pour une structure non soudée sous la variation de l'amplitude de chargement maximale de 100, 140 et 170MPa. La vitesse da/dN pour une contrainte maximale de 170MPa est importante comparativement aux vitesses pour une contrainte maximale de chargement cyclique de 100MPa et est de l'ordre de 4.86×10^{-7} m/cycle pour une longueur de 40mm. La vitesse à la même longueur de fissure pour une contrainte maximale de chargement cyclique de 100MPa est de l'ordre de 1.18×10^{-7} m/cycle, ce qui engendre un accroissement de la vitesse de 4.12 fois.

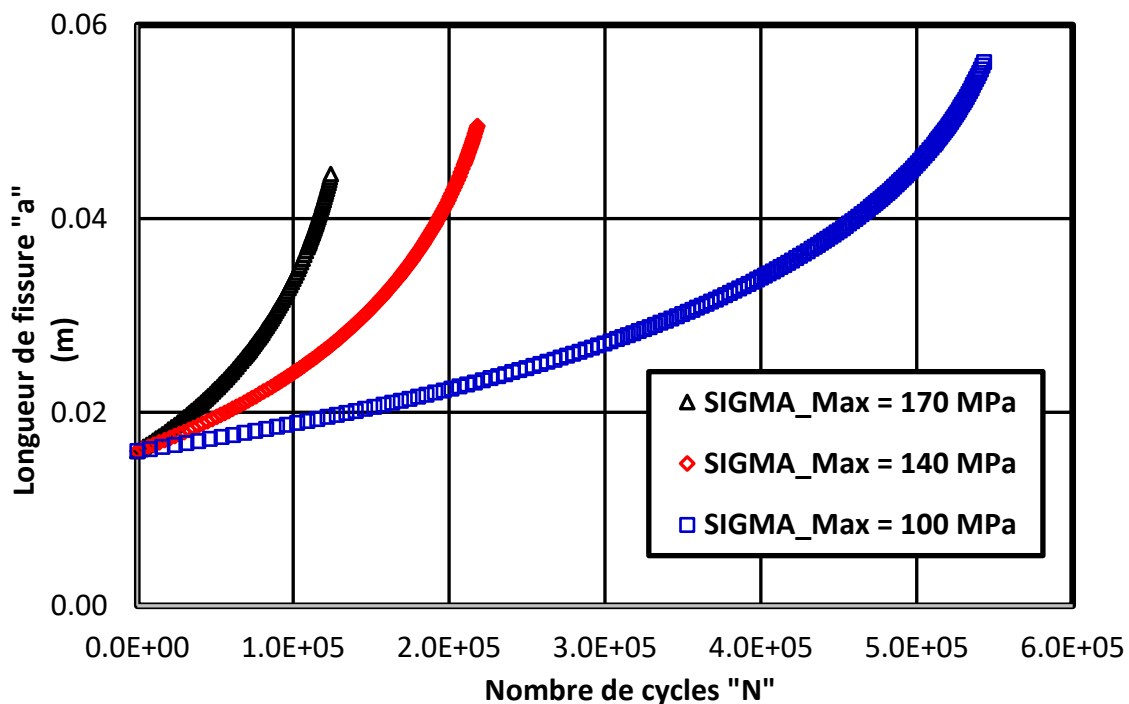


Figure 4.3 : Effet de l'amplitude de chargement sur la durée de vie pour $R = 0.35$

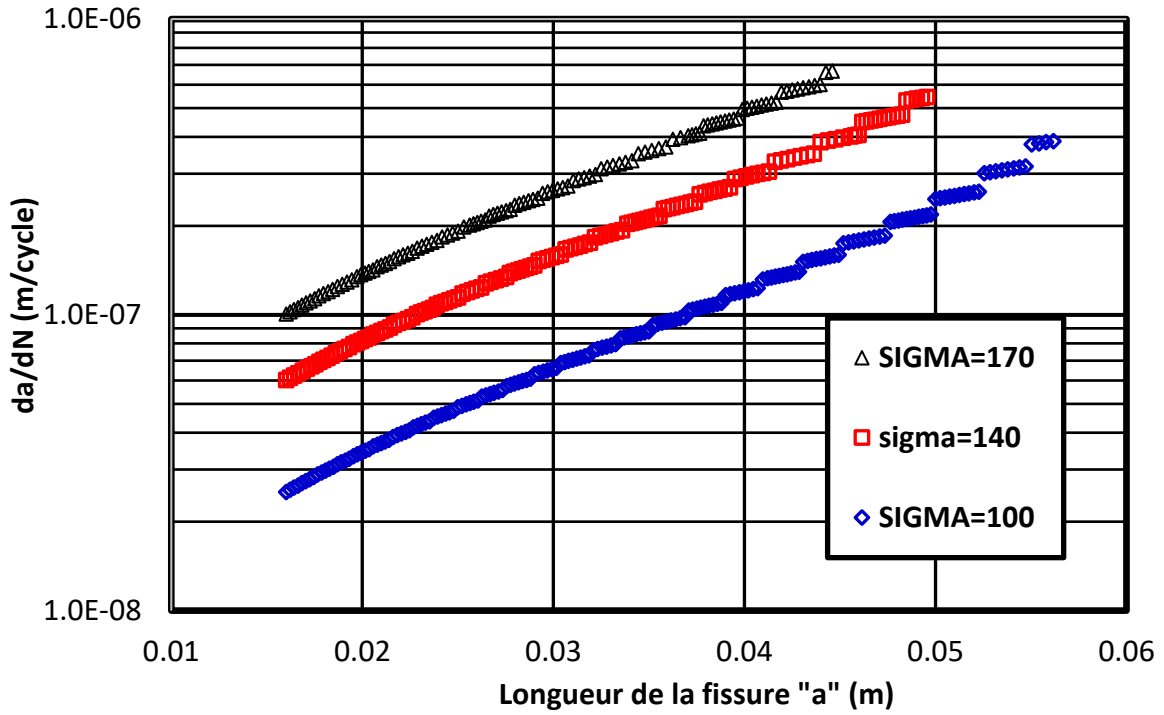


Figure 4.4 : Effet de l'amplitude de chargement sur la vitesse de fissuration pour R = 0.35

3. Effet des contraintes σ_r dues au soudage

3.1. Profil réel des contraintes σ_r

La figure 4.5 représente la distribution des contraintes résiduelles pour un joint en bout à bout dues au soudage manuel par électrode enrobé pour le matériau 18G2AV similaire à notre matériau (A645 Gr 45) considéré par la présente étude. Deux profils sont considérés à savoir le profil réel dans le sens longitudinal et le même profil linéarisé. La moitié de la distribution des contraintes longitudinales perpendiculaires au plan de propagation des fissures (figure 4.6). On note que la contrainte maximale pour un profil réel est de 200MPa mais ces contraintes sont redistribuées par l'usinage de l'entaille à une profondeur de 16 mm et la contrainte maximale considérée lors de la propagation est de 40 MPa. Pour un profil linéarisé la contrainte maximale est de 120MPa et reste la même après usinage de l'entaille et la contrainte minimale est de -40MPa alors qu'elle est de -47.5MPa pour le profil réel.

Le facteur d'intensité de contraintes dû aux contraintes résiduelles est déterminé par intégration numérique de gauss selon l'équation suivante :

$$K_r = \int \sigma_r H(a, x) \cdot da \quad (1)$$

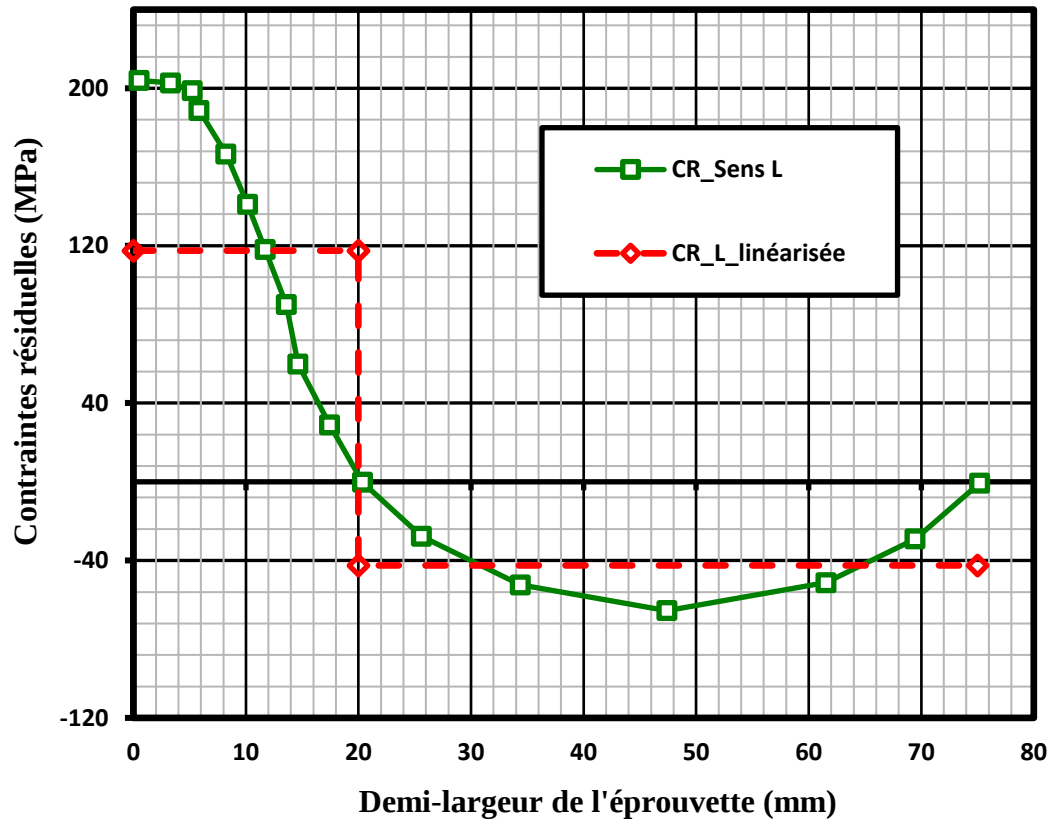


Figure 4.5 : Profil des contraintes résiduelles σ_r pour joint en bout à bout

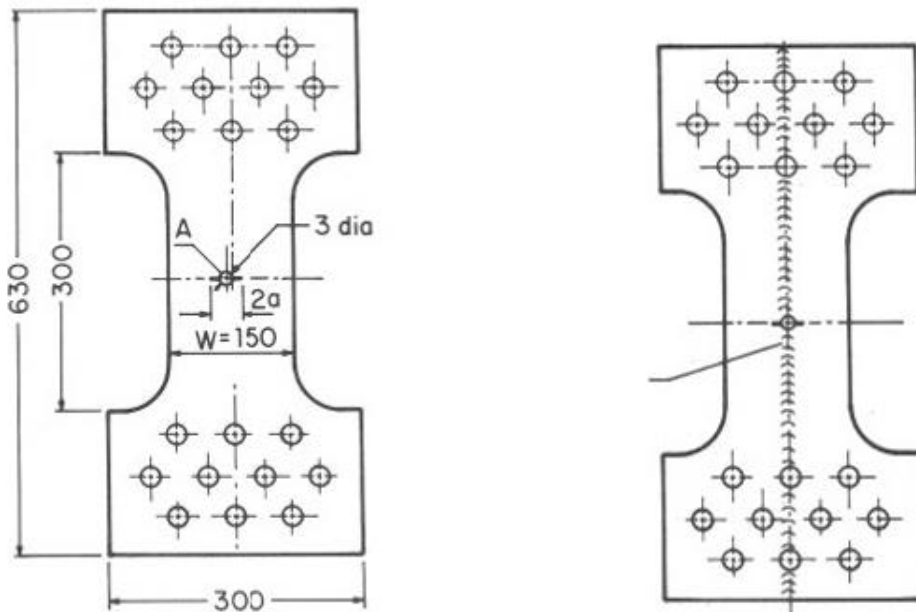


Figure 4.6 : Formes et dimensions d'éprouvettes soudées longitudinalement

La figure 4.7 met en évidence l'effet du rapport "R" sur l'évolution de la durée de vie en fatigue en présence des contraintes σ_r à profil réel (figure 4.5). On note le même constat que dans le cas d'éprouvettes sans contraintes résiduelles (augmentation du nombre de cycle par l'augmentation du rapport "R"). Le nombre de cycle maximal pour R=0.5 est de 209000 cycles par contre pour R=0.1, elle est de 77000 cycles ce qui engendre une augmentation de 2.71 fois. Pour les vitesses de fissuration da/dN (figure 4.8), aucune différence significative n'est constatée avant 40MPa.sqrt(m). Au-delà de 40MPa.sqrt(m), une augmentation de la vitesse de fissuration est constaté pour R=0.5 et R=0.35 jusqu'à rupture, par contre pour R=0.1 et 0.2, aucun décalage important des courbes de fissuration est remarqué. Pour des longueurs de fissure bien définies, on note une diminution de la vitesse de fissuration avec l'augmentation du rapport de charge (figure 4.9). Au-delà de 33 mm de fissure pour R=0.1 et R=0.2, l'effet du rapport de charge est négligé et cela est dû à l'effet du rapport de charge effectif (figure 4.10) qui atteint des valeurs négatives par diminution de K_r (figure 4.11) à des valeurs négatives qui sont dues aux contraintes résiduelles de compression.

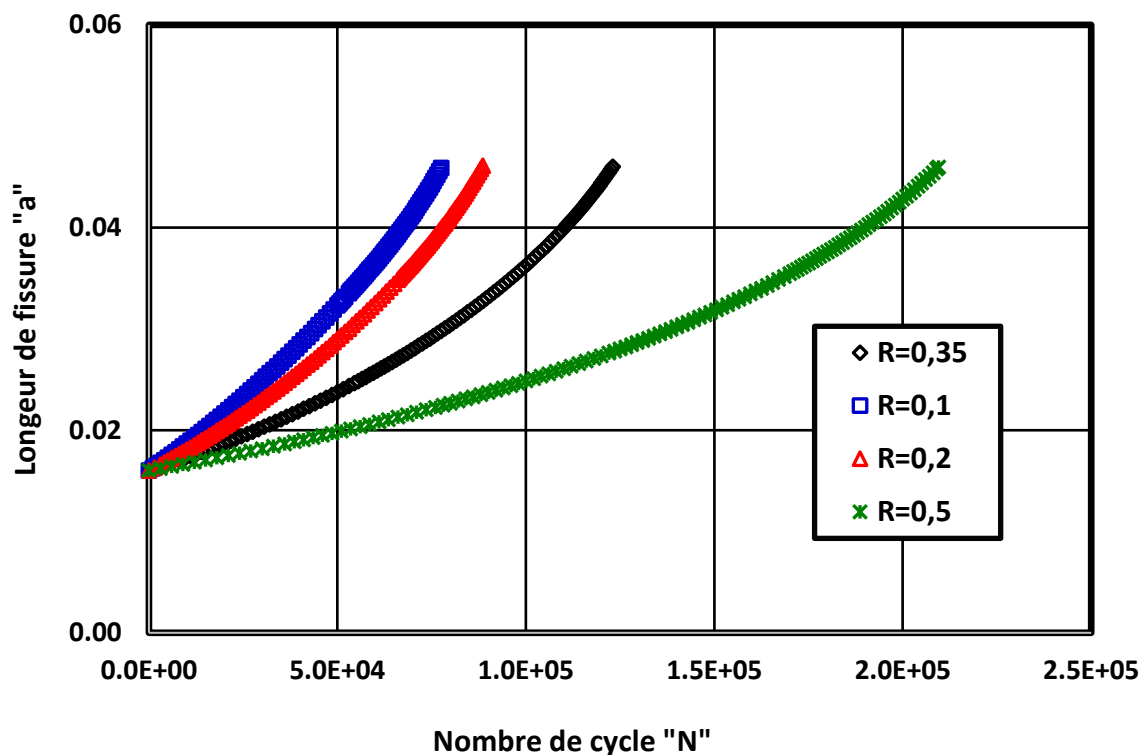


Figure 4. 7: Effet du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue pour $\Delta\sigma=170$ MPa en présence des contraintes résiduelles

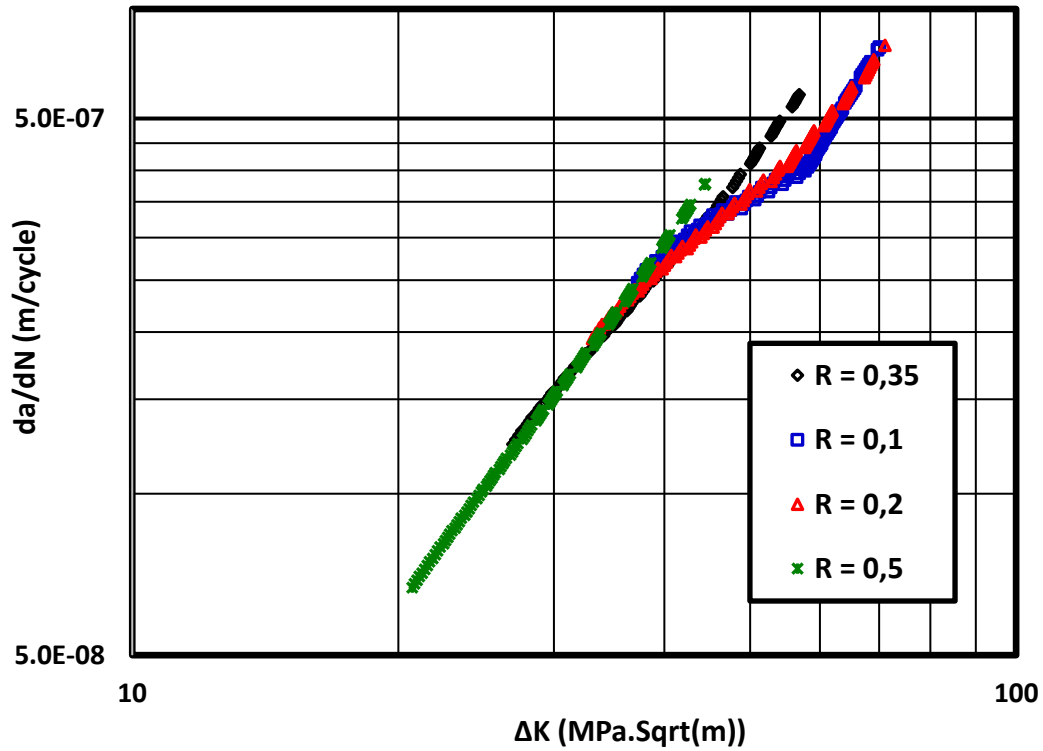


Figure 4.8: Effet du rapport "R" sur la vitesse de fissuration pour $\Delta\sigma=170\text{MPa}$ en présence des contraintes σ_r

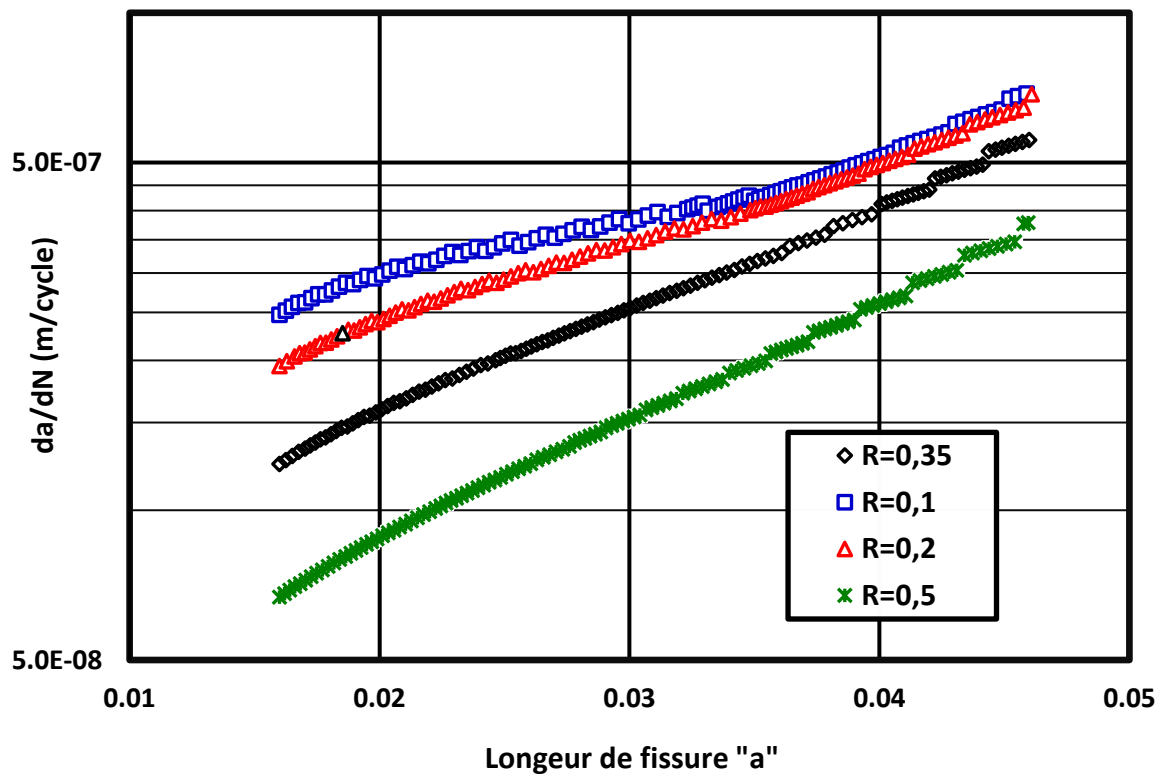


Figure 4.9 : Vitesse de fissuration da/dN en fonction de "a" pour $\Delta\sigma=170\text{MPa}$ en présence des contraintes σ_r

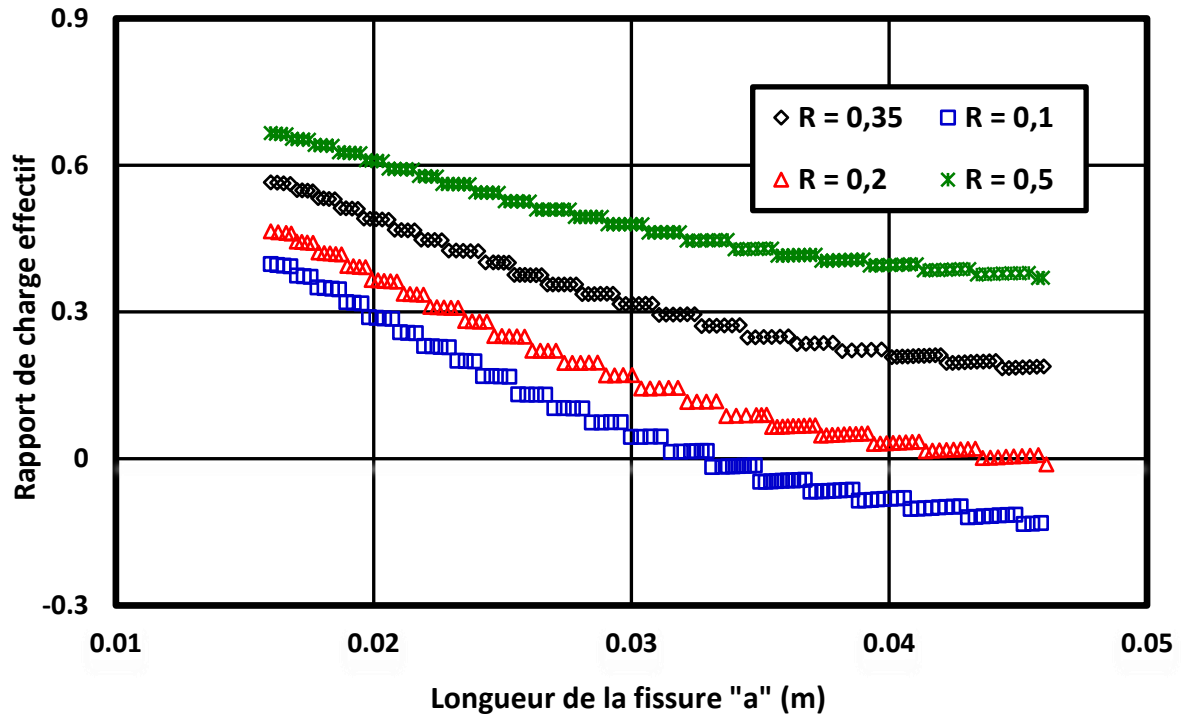


Figure 4.10 : Rapport de charge effectif en fonction de "a" pour $\Delta\sigma=170\text{MPa}$ en présence des contraintes σ_r à profil réel

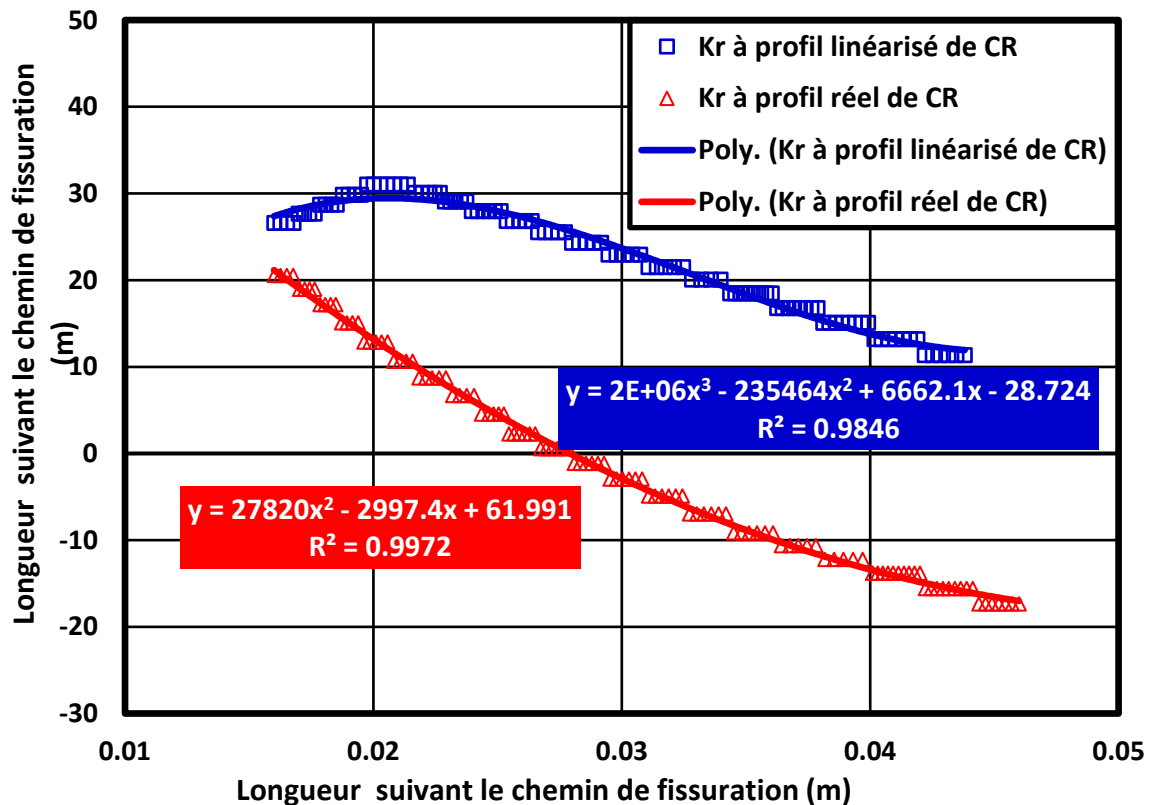


Figure 4.11 : Evolution du facteur d'intensité de contrainte dû aux contraintes σ_r à profils réel et linéarisé

3.2. Profil linéarisé des contraintes résiduelles

La figure 4.13 représente l'effet du rapport "R" sur la durée de vie en fatigue avec un chargement maximal cyclique de 170MPa en présence des contraintes σ_r linéarisées dont la contrainte résiduelle maximale est en tension où la valeur à 16 mm est de 120MPa. Cette valeur pour un profil réel à 16 mm de fissure initiale est de 40MPa. On note aussi que l'augmentation du rapport "R" fait accroître le nombre de cycle de fatigue. La durée de vie en fatigue passe de 5×10^4 cycles pour $R=0.1$ à 1.84×10^5 cycles ce qui présente une augmentation de 3.68 fois. La longueur finale moyenne de rupture est de 44.5 mm pour les différents rapports de charge. En présence des contraintes résiduelles à profil linéarisé, aucun effet n'est constaté sur l'accroissement des vitesses da/dN en fonction du facteur d'intensité de contraintes dans le domaine de propagation stable. A titre d'exemple pour $\Delta K=40\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$, les vitesses de fissuration sont autour de 3.24×10^{-7} m/cycle. L'effet principal réside dans le facteur d'intensité de contrainte en début de fissuration qui diminue avec $\Delta K=36.2\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ l'augmentation du rapport "R". A $R=0.5$, la vitesse da/dN est de 6.85×10^{-8} m/cycle avec $\Delta k=20.73\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ par contre pour $R=0.1$, la vitesse de fissuration est de 2.75×10^{-7} m/cycle pour un $\Delta k=36.2\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$.

Pour plus de détails, on a tracé l'évolution de la vitesse de fissuration en fonction de la longueur de la fissure (figure 4.15). On note que la vitesse da/dN augmente avec la diminution du rapport "R". Ce résultat a été aussi constaté dans le cas de l'évolution de $a=f(N)$. A une même longueur de fissure de 30 mm, la vitesse de fissuration passe de 6.0×10^{-7} m/cycle pour $R=0.1$ à 1.72×10^{-7} m/cycle pour $R=0.5$ ce qui représente un taux de réduction en vitesse de 3.45 fois.

Au cours de la fissuration et en présence des contraintes σ_r de traction ou de compression à un rapport "R" appliqué, les effets des contraintes résiduelles σ_r sont induits avec effet du rapport "R" qui devient un rapport effectif " R_{eff} " défini comme suit :

$$R_{eff} = \frac{K_{min} + K_r}{K_{max} + K_r} \quad (1)$$

La figure 4.16 montre l'évolution du rapport " R_{eff} " effectif en fonction de la longueur de la fissure c.à.d. la valeur de la contrainte résiduelle à chaque longueur. Le rapport " R_{eff} " effectif augmente avec l'augmentation du rapport "R" des contraintes cycliques appliquées. A une longueur de fissure de 30 mm et en présence des contraintes σ_r de nature tensionnelle et

compressive, le rapport de charge effectif passe de 0.63 pour $R=0.5$ à 0.35 pour $R=0.1$. L'augmentation du rapport de charge est due principalement à la présence des contraintes résiduelles de tension.

On note aussi d'après la figure 4.16 que le rapport " R_{eff} " effectif diminue avec l'augmentation de la longueur de la fissure c.à.d. la diminution des contraintes résiduelles à profil linéarisé qui passe de 120MPa à -40MPa. Entre une longueur de fissure de 16 mm et une longueur de 20 mm, le rapport de charge effectif est constant, cela est dû aux contraintes résiduelles de tension constantes dans la zone spécifiée. Dans la zone 20 mm à 50 mm de longueur de fissure, le rapport de charge effectif diminue. Par exemple pour $R=0.1$, le rapport de charge effectif passe de 0.45 à 0.21 parce que les contraintes résiduelles diminuent.

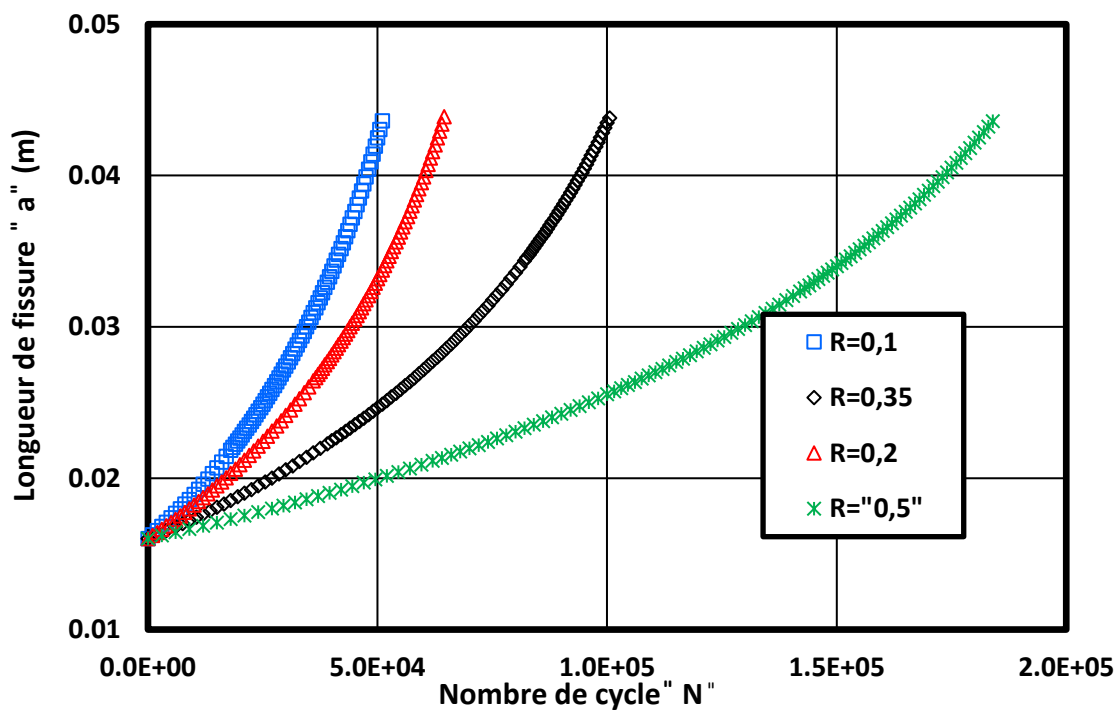


Figure 4. 12 : Effet du rapport "R" sur la durée de vie en fatigue en présence des contraintes linéarisées d'un joint soudé bout à bout

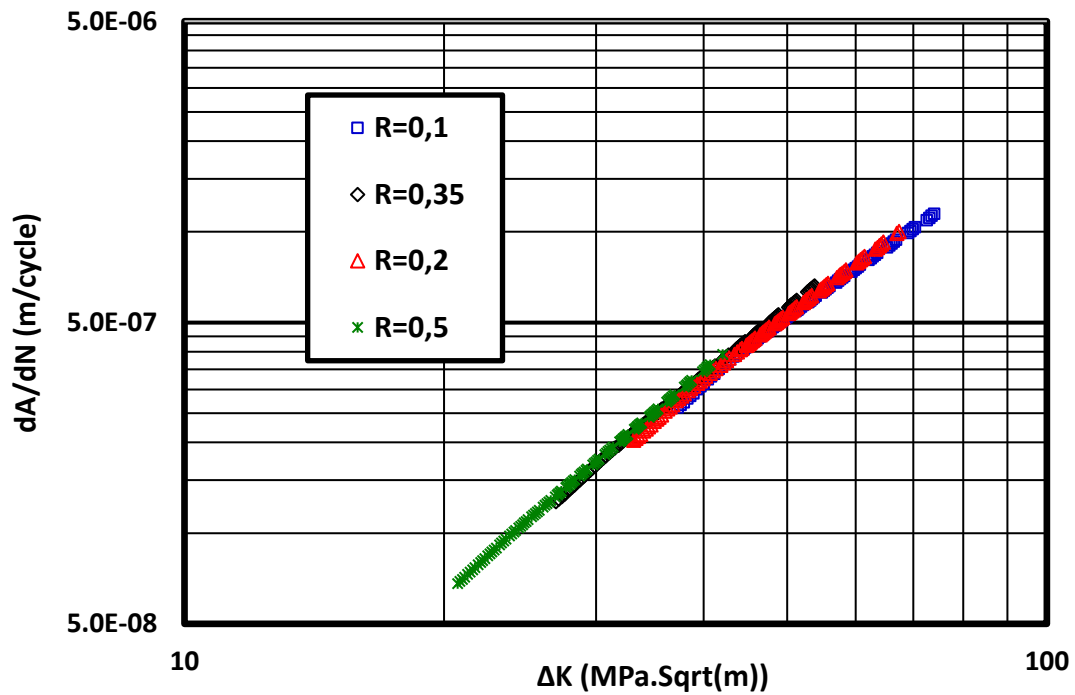


Figure 4.13 : Effet du rapport de charge et contraintes résiduelles linéarisées d'un joint soudé bout à bout

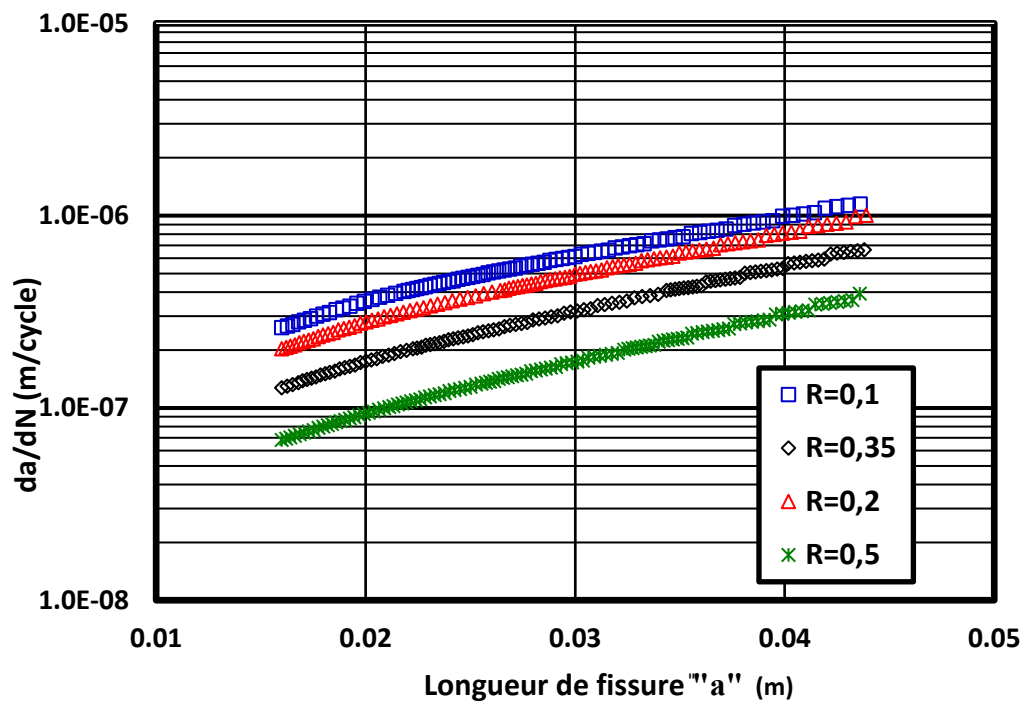


Figure 4.14 : Effet du rapport "R" et contraintes linéarisées d'un joint soudé bout à bout

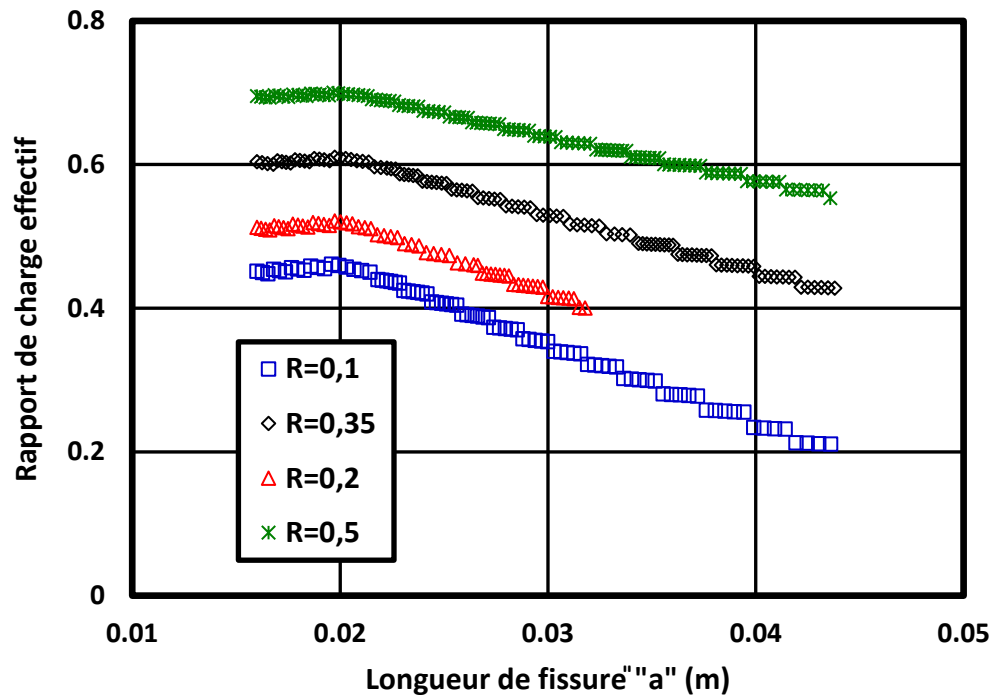


Figure 4.15 : Evolution du rapport "R" effectif en présence des contraintes à profil linéarisé d'un joint soudé bout à bout

3.3. Etude comparative en présence des contraintes σ_r réelles et linéarisées

Une comparaison du comportement en fissuration par fatigue en absence et en présence des contraintes dues au soudage selon un profil réel et un profil linéarisé pour un rapport $R=0.35$ est présentée. La figure 4.17 met en évidence l'effet des contraintes résiduelles de tension pour un profil linéarisé sur la durée de vie en fatigue. La présence des contraintes ($\sigma_{r-max} = 120\text{MPa}$) augmente le facteur d'intensité de contraintes résiduelles " K_r " et en conséquence le rapport de charge effective R_{eff} et l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte Δk d'où une réduction de la durée de vie en fatigue par rapport à la durée de vie de la structure non soudée. Pour le profil réel, on note une augmentation de la durée de vie en fatigue par rapport à la structure soudée à profil linéarisé. Cette augmentation en durée de vie est de l'ordre de 22000 cycles. Par rapport à la structure non soudée on note une diminution négligeable en durée qui est de l'ordre de 500 cycles. En analysant par rapport à la longueur fissurée (par exemple $a=40\text{ mm}$), on constate une différence en durée de vie respectivement par rapport au contraintes résiduelles dues au soudage à profil linéarisé et réel par rapport la structure non soudée de 20000 cycles et 7000 cycles. La faible différence de 7000 cycles est due à la propagation de la fissure suivant un champ de contraintes résiduelles de tension de 40MPa et un champ de contraintes résiduelles compressive dont la valeur maximale est de -

65.5MPa. Pour un rapport $R=0.35$, les vitesses da/dN en absence et en présence des contraintes dues au soudage sont données par la figure 18. En début de fissuration aucune différence en vitesse de fissuration entre les deux profils des contraintes résiduelles n'est significative jusqu'à un $\Delta K=30\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$. Mais par rapport à la structure non soudée on note un décalage de cette dernière vers le bas. Au-delà de $30\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$, la courbe des vitesses à contraintes résiduelles de profil réel, un décalage régulier vers des faibles vitesses. L'analyse conjointe de la courbe de fissuration à contraintes résiduelles à profil réel et la courbe de fissuration sans contraintes résiduelles montre une intersection des courbes. Au-delà de $40\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$, on note une diminution des vitesses de fissuration pour la structure soudée à profil réel cela est dû à la propagation de la fissure dans un champ de contraintes résiduelles de compression jusqu'à la rupture, ce constat est prouvé expérimentalement dans les travaux de Glinka [41] et Benachour et al. [39]. La différence en vitesse de fissuration peut s'expliquer par la variation du rapport de charge effectif (figure 19) qui a une liaison directe sur l'amplitude de chargement appliquée en présence des contraintes résiduelles.

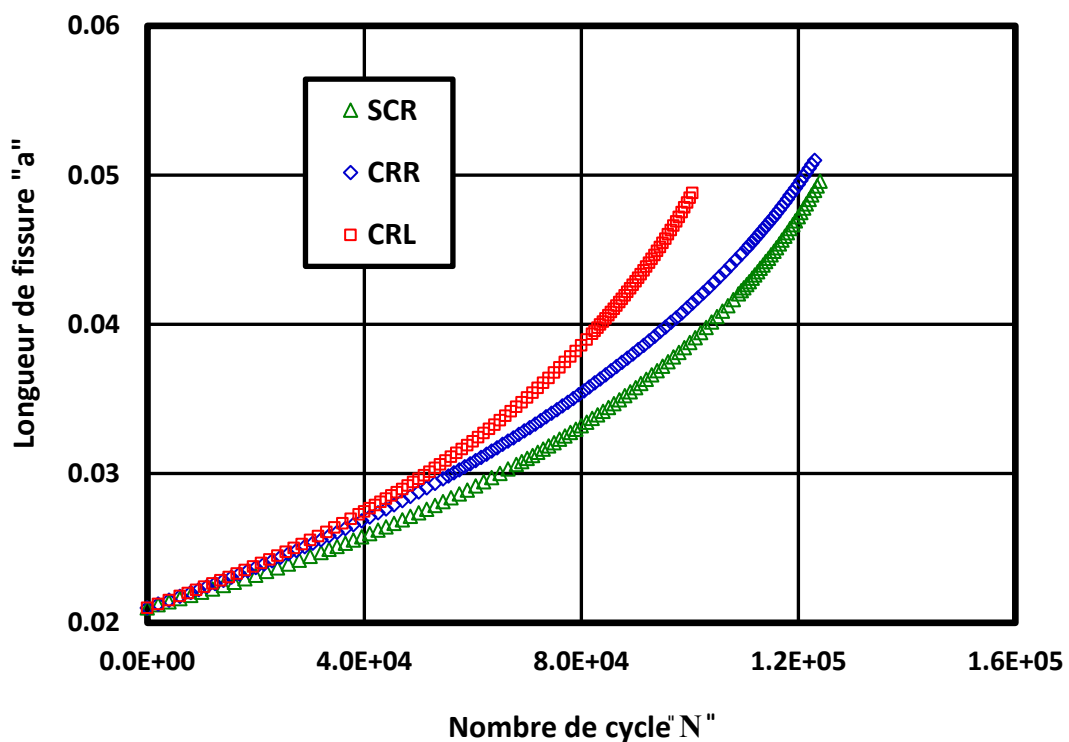


Figure 4.16 : Effet des contraintes résiduelles à profil réel et linéarisé sur la durée de vie en fatigue d'un joint soudé bout à bout

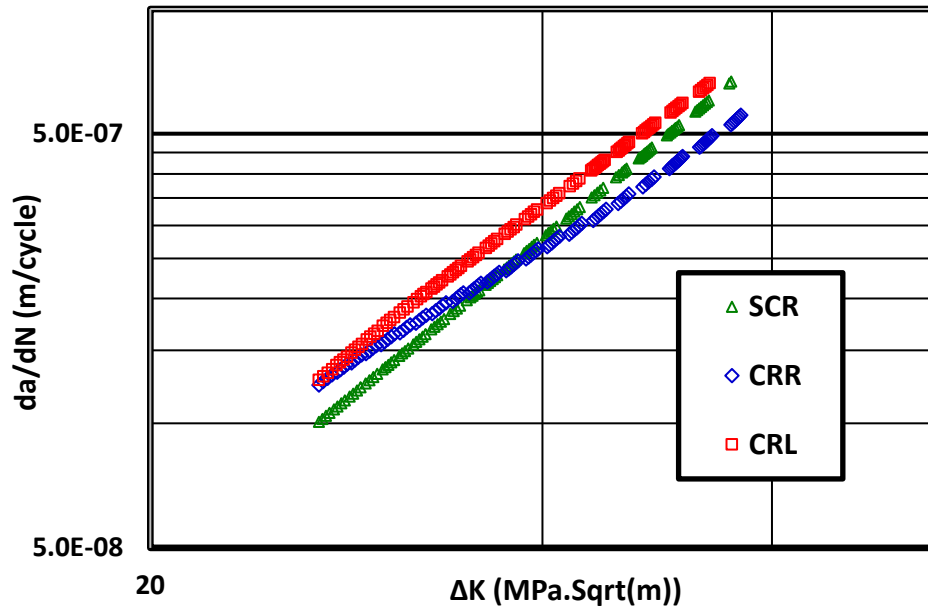


Figure 4. 17: Effet des contraintes résiduelles à profil réel et linéarisé sur la vitesse de fissuration d'un joint soudé bout à bout

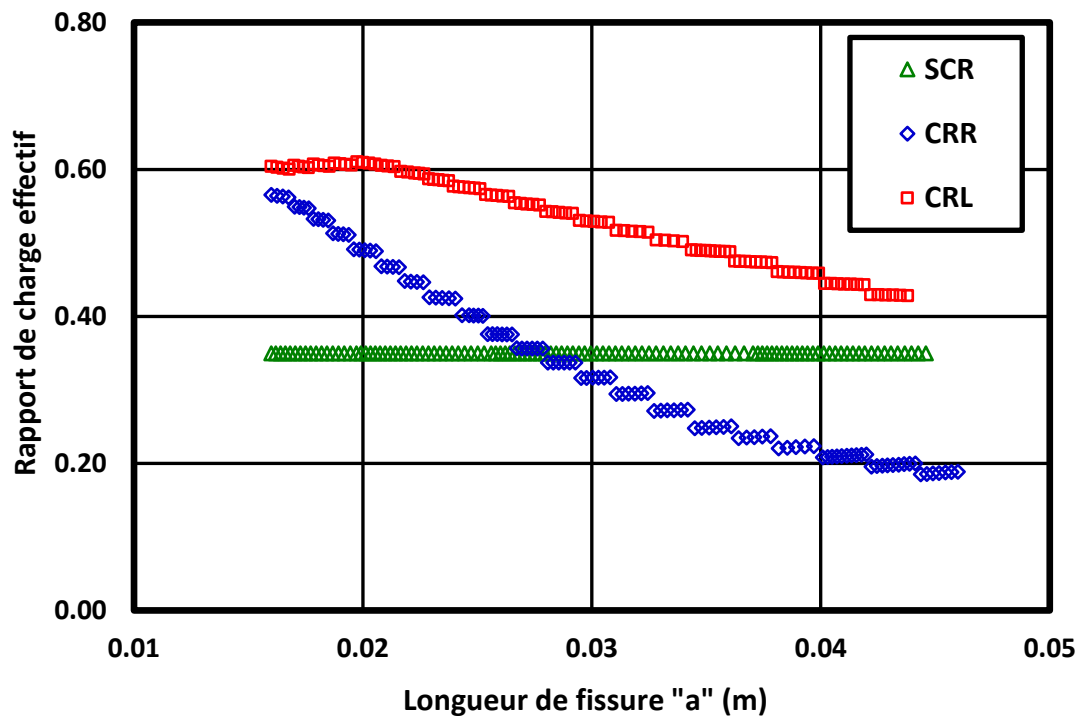


Figure 4. 18: Evolution du rapport " R_{eff} " effectif en fonction de " a " en fonction des contraintes à profil réel et linéarisé pour $R=0.35$

Conclusion générale

Le présent mémoire explore la relation entre la fissuration par fatigue dans les joints soudés et les contraintes résiduelles dues au soudage, offrant ainsi des perspectives importantes pour l'amélioration de la fiabilité et de la durabilité des structures soudées.

Une synthèse d'un état de l'art a été présentée sur les effets des contraintes internes dues au soudage sur la propagation des fissures de fatigue.

À travers l'utilisation de la base de données expérimentales de propagation de l'acier ASTM grade Steel GA645 (5% ni) en absence des contraintes résiduelles, une technique implémenté dans le code AFGROW est appliquée afin d'introduire les contraintes résiduelles dues au soudage par électrode enrobée. Les profils des contraintes résiduelles considérés sont de deux types, réel et linéarisé. Les résultats qui découlent de la présente étude se résument aux points suivant :

L'accroissement du rapport "R" fait accroître la durée de vie et la vitesse da/dN de fissuration avec un faible effet dans la zone de propagation stable.

En présence des contraintes résiduelles, on note le même effet du rapport de charge.

Les effets des profils des contraintes résiduelles se traduisent par des effets de rapport de charge effectif.

La présence des contraintes résiduelles à profil réel à une profondeur initiale de 16 mm présente un faible effet sur la durée de vie et la vitesse de fissuration (forte effet des contraintes résiduelles de compression) comparativement à la durée de vie et la vitesse de fissuration pour un profil linéarisé où l'état de tension des contraintes résiduelles est dominant à la même fissure initiale.

En générale, l'inclusion des contraintes résiduelles dans l'analyse théorique permet des prédictions plus réalistes et permet de prédire la durée de vie de fatigue des soudures avec plus de précision sur la base des données obtenues uniquement à partir du matériau de base.

En perspectives, on projette d'étudier la propagation des fissures en présence des contraintes résiduelles et sous des chargements cycliques variables.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Stephens R.I., A. Fatemi, R.R. Stephens, H.O. Fuchs (2001). Metal fatigue in engineering. 2nd Edition, John Willy and sons, New-York, p.472
- [2] M. Mlikota, S. Schmauder, Ž. Božić (2018). Calculation of the Wohler (S-N) curve using a two-scale model. International Journal of Fatigue, Volume 114, pp. 289-297.
- [3] Donka Angelova, Rozina Yordanova, Tsvetelina Lazarova, Svetla Yankova (2014). On fatigue behavior of two spring steels. Part I: Wohler curves and fractured surfaces. Procedia Materials Science 3, pp. 1453-1458.
- [4] Guèye Diagne (2018). Influence des paramètres d'usinage et de chargement sur le comportement en fatigue des attaches à doigts d'ailettes de turbine à vapeur. Univ-lorraine, France.
- [5] Frank, K.H., J.W. Fisher (1979). Fatigue strength of fillet welded cruciform joints. Journal of the Structural Division ASCE, vol. 105, pp. 1727-1740.
- [6] P. Hariprasath, P. Sivaraj, V. Balasubramanian, Srinivas Pilli, K. Sridhar (2023). Influence of stress ratio on fatigue behaviour of gas metal arc welded naval grade HSLA steel joints: Assessment of safe and unsafe region for ship hull fabrication. Engineering Failure Analysis. Volume 148, 107216.
- [7] Martin Leitner (2017). Influence of effective stress ratio on the fatigue strength of welded and HFMI-treated high-strength steel joints. International Journal of Fatigue, Volume 102, pp. 158-170.
- [8] Walker, E.K. (1970). The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7076-T6 aluminum. In: Effect of environment and complex load history on fatigue life", ASTM STP 462, pp.1–14.
- [9] Forman, R.G., (1972). Study of fatigue crack initiation from flaws using fracture mechanics theory. Engineering Fracture Mechanics. Vol. 4(2), pp. 333–345.
- [10] R.O. Ritchie (1977). Influence of microstructure on near-threshold fatigue-crack propagation in ultra-high strength steel. Metal Science, 11(8-9), pp 8-9.
- [11] L.L. MET-X, (1992). Détermination des contraintes résiduelles par diffraction des rayons X". ENSAM Paris, Paris, Document de formation générale.
- [12] H. Krause, H.-H. Jühe, (1977). Internal stresses during rolling friction and their evaluation. Wear, Volume 41, Issue 1, pp.15-23.
- [13] T. Kebir (2013). "Etude de l'effet des contraintes résiduelles sur la propagation de fissure de fatigue". Mémoire de Magister, Université de Sidi Bel Abbes.

- [14] Anne-Sophie Bilat (2007). Estimation du risque de rupture fragile de soudures de pipelines en aciers à haut grade caractérisation et modélisation. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France.
- [15] M. Zaoui (2000) "Caractérisation mécaniques et métallurgiques des joints de soudure, étude comparative entre deux procédés de soudage, le soudage MIG et le soudage au chalumeau". Mémoire de Magister. Université Sidi Bel Abbès.
- [16] K. Sindo (2003). Welding Metallurgy, Second Edition. p 122-124.
- [17] Yuyang Li, Heng Zhang, Wei Zhu, Yangrui Cheng, Wenbo Ma (2023). Numerical evaluation of welding residual stress of X80 pipeline steel under the influence of various welding process parameters. Marine Georessources & Geotechnology, Vol. 41(10), pp 1092–110.
- [18] Akihiko Ohta, Yoshio Maeda, Masao Kanao (1984). Significance of residual stress on fatigue properties of welded pipes. International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 15(3), pp.229-240.
- [19] M. Anastassiou, M. Babbitt, J.L. Lebrun (1990). Residual stresses and microstructure distribution in spot-welded steel sheets: Relation with fatigue behaviour. Materials Science and Engineering: A, Vol. 125(2), pp. 141-156.
- [20] D. Radaj, C. M. Sonsino, W. Fricke, Fatigue assessment of welded joints by local approaches second edition (2006).
- [21] R. Galatolo, A. Lanciotti, (1997). Fatigue crack propagation in residual stress fields of welded plates. International Journal of Fatigue, Vol. 19(1) pp. 43-49.
- [22] Akihiko Ohta, Naoyuki Suzuki, Yoshio Maeda, (1997). Unique fatigue threshold and growth properties of welded joints in a tensile residual stress field, International Journal of Fatigue, Vol. 19(93), pp 303-310.s
- [23] Gerhard Biallas, Effect of welding residual stresses on fatigue crack growth thresholds, International Journal of Fatigue, Vol. 50, pp.10-17.
- [24] D.V. Nelson (1982). Effect of residual stress on fatigue crack propagation, residual stress effects in fatigue, ASTM STP 776, 172–174.
- [25] K. Chongmin, D.E. Diesburg, et al. (1982). Effect of residual stress on fatigue fracture of case-hardened steels - an analytical model, residual stress effects in fatigue, ASTM STP 776, pp. 224-234.
- [26] Shiga, C., Murakawa, E., Matsuo, Y. et al. Fatigue improvement in high-strength steel welded joints with compressive residual stress. Weld World 58, 55–64 (2014)

- [27] Huang, C., Pan, Y. & Chuang, T. (1997). Effects of post-weld heat treatments on the residual stress and mechanical properties of electron beam welded SAE 4130 steel plates. *J. of Materi Eng and Perform* 6, pp. 61-68.
- [28] Zhang, X., Wang, J., Ma, Y., Liu, D., Gao, R., Xu, R., Zhao, Z., Chen, S., Wang, Z. (2024). Residual stress effects on short crack propagation behavior in friction stir welded 7075-T6 aluminum alloy panel under biaxial loading: An experimental and numerical study, *Engineering Fracture Mechanics* (2024),
- [29] Nguyen T. Ninh, M.A. Wahab (1995). The effect of residual stresses and weld geometry on the improvement of fatigue life. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 48(1–4), pp. 581-588.
- [30] T. Ninh Nguye, M.A. Wahab (1998). The effect of weld geometry and residual stresses on the fatigue of welded joints under combined loading. *Journal of Materials Processing Technology* 77, pp. 201–208.
- [31] Nateghi, E., Volukola, A.G. (2016). Experimental and numerical investigation into effect of weld configuration geometry on distribution of residual stress and temperature in the welded parts of stainless steel. *Int J Adv Manuf Technol* 87, pp. 2391-2404.
- [32] John R, Jata KV, Sadananda K. (2003). Residual stress effects on near-threshold fatigue crack growth in friction stir welds in aerospace alloys. *Int J Fatigue*, vol. 25, pp 939–48.
- [33] Braun R, Biallas G, Dalle Donne C, Staniek G. (2000). Characterisation of mechanical properties and corrosion performance of friction stir welded 6013 aluminium alloy sheet. In: Winkler PJ, editors. *Proc EUROMAT99 – materials for transportation technology*, vol. 1. Weinheim: Wiley-VCH; 2000. p. 150–5.
- [34] Farajian, M. Welding residual stress behavior under mechanical loading. *Weld World* 57, 157–169 (2013).
- [35] Hensel, J., Nitschke-Pagel, T. & Dilger, K. (2017). Engineering model for the quantitative consideration of residual stresses in fatigue design of welded components. *Weld World* 61, 997–1002 (2017).
- [36] Le Wang, Xudong Qian (2022). Welding residual stresses and their relaxation under cyclic loading in welded S550 steel plates. *International Journal of Fatigue* 162, 106992
- [37] J.A Harter, (2006). “AFGROW users guide and technical manual: AFGROW for Windows 2K/XP”. Version **4.0011.14**, Air Force Research Laboratory.

- [38] R.G Forman, S.R Mettu. "Behavior of surface and corner cracks subjected to tensile and bending loads in Ti-6Al-4V alloy". Fracture Mechanics 22nd Symposium, Vol. 1, ASTM STP 1131, H.A. Saxena and D.L. McDowell, eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992.
- [39] Benachour, M., Benachour, N., & Benguediab, M. (2017). Fractographic observations and effect of stress ratio on fatigue striations spacing in aluminium alloy 2024 T351. In Materials Science Forum (Vol. 887, pp. 3-8). Trans Tech Publications, Ltd.
- [40] Paris PC, Erdogan F. A critical analysis of crack propagation law. Journal Basic Engineering 1963; 85(4): 528-539.
- [41] Glinka ,” Effect of Residual Stress on fatigue Crack Growth in Steel Weldments under Constant and Variable Amplitude Loads,” Fracture Mechanics, ASTM STP 677,C,Smith,ed,American Society for Testing and materials ,1979,pp,198