

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 عبد القادر
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 : **BENAFROUL Linda**

Thème

Analyse combinée des effets des contraintes résiduelles dues au soudage et chargements Variables sur la fissuration par fatigue

Soutenu publiquement, le 19/06/2025, devant le jury composé de

Président	:	BENSAID Ismaïl	MCA	Université de Tlemcen
Encadreur	:	BENACHOUR Mustapha	Pr	Université de Tlemcen
Co-encadreur:		BENACHOUR Nadjia	MCB	Université de Tlemcen
Examineur	:	HADJOUI Féthi	MCA	Université de Tlemcen

Année Universitaire 2024/2025

DÉDICACES

Je dédie ce travail :

À mes parents,

Que Dieu vous protège... Vous êtes ma fierté, mon refuge, et ma plus grande bénédiction. Ce mémoire est le fruit de vos sacrifices, de votre patience, et de votre amour inconditionnel.

À ma famille,

Pour votre soutien sincère, votre présence rassurante, et vos encouragements dans chaque étape.

À mes amies de cœur :

Imène, Bouchra, et Souad,

Merci d'avoir été là, dans les moments de doute comme dans les éclats de rire. Votre amitié est un cadeau précieux dans ce parcours.

À tous ceux qui ont été une lumière sur mon chemin,

Je vous en suis profondément reconnaissante.

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, je remercie Dieu, le Tout-Miséricordieux, de m'avoir accompagnée à chaque étape de ce parcours, de m'avoir donné la force dans les moments de doute et le courage de continuer, même quand tout semblait difficile.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Monsieur BENACHOUR Mustapha, mon encadreur, pour sa patience, ses conseils avisés, et sa disponibilité ainsi qu'à Mme BENACHOUR Nadjia pour sa contribution à ce travail. Merci d'avoir cru en moi et de m'avoir guidée avec rigueur et bienveillance. Mes remerciements vont aussi aux membres de jury. Je remercie également tous les enseignants du département de génie mécanique pour les connaissances transmises et leur accompagnement tout au long de ma formation.

À mes chers parents... sans mots pour exprimer ce que je ressens à votre égard. Ni votre amour, ni vos sacrifices, ni vos prières à voix basse, n'auraient pu me faire aller si loin. Vous êtes et serez toujours ma source de motivation.

Merci du fond du cœur à mes amies précieuses : Imène, Bouchra, Souad. Pour votre présence sans faille, pour votre sincérité encourageante et les éclats de rire, pour votre amitié constante. Avec vous, cette aventure n'aurait pas été pareille.

Enfin, merci à toutes personnes qui ont, à quelque titre que ce soit, laissé une empreinte sur ce chemin. Ce travail est un peu de moi, mais beaucoup de vous.

ABSTRACT

This thesis investigates the effect of residual stresses caused by welding on fatigue crack propagation in butt-welded joints. The study analyzes the influence of these stresses under two loading conditions: constant loading ($R = 0.5$) and variable loading with overload ($ORL = 2.0$), considering two initial crack lengths ($a_0 = 5 \text{ mm}$ and $a_0 = 10 \text{ mm}$).

The results show that residual stresses can significantly reduce fatigue life, especially under constant loading. Under variable loading, the beneficial effect of overload may be counteracted by the presence of tensile residual stresses. Additionally, the initial crack length plays a crucial role in crack propagation rate and overall fatigue life. The analysis also highlights the evolution of the stress intensity factor and the effective stress ratio (R_{eff}), both influenced by residual stresses.

Keywords: Fatigue, residual stresses, welding, constant loading, variable loading, crack, fatigue life

ملخص

تهدف هذه المذكرة إلى دراسة تأثير الإجهادات المتبقية الناتجة عن عملية اللحام على انتشار الشقوق الناتجة عن الكلال في الوصلات الملحومة من نوع "dlewttub". تم تحليل هذا التأثير تحت حالتين من التحميل : تحميل ثابت ($R = 0.5$) وتحميل متغير مع وجود زيادة مفاجئة ($LRO = 2.0$)، مع الأخذ بعين الاعتبار طولين ابتدائيين للشقوق ($a_0 = 5$ مم و

$a_0 = 10$ مم). أظهرت النتائج أن الإجهادات المتبقية تؤثر بشكل كبير على عمر الكلال، حيث تسببت في تقليصه بشكل ملحوظ تحت التحميل الثابت. أما تحت التحميل المتغير، فقد أدى وجود زيادة مفاجئة في الحمل إلى تحسين عمر الكلال في غياب الإجهادات المتبقية، لكن هذا التأثير الإيجابي تلاشى عند وجود إجهادات متبقية شديدة. كما تبين أن لطول الشق الابتدائي دورًا هامًا في سرعة انتشار الشق وفي عمر الكلال الكلي. وقد تم كذلك تحليل تطور عامل شدة الإجهاد ونسبة التحميل الفعالة (R_{eff}) المرتبطة بتأثير هذه الإجهادات. تؤكد هذه الدراسة على ضرورة أخذ الإجهادات المتبقية بعين الاعتبار عند التنبؤ بعمر الكلال في البنى الملحومة المعرضة لتحميلات دورية.

الكلمات المفتاحية: الكلال، الإجهادات المتبقية، اللحام، التحميل الثابت، التحميل المتغير، الشقوق، عمر الكلال

RÉSUMÉ

Ce mémoire traite de l'effet des contraintes résiduelles dues au soudage sur la fissuration par fatigue dans des joints soudés en bout à bout. L'étude vise à analyser l'influence de ces contraintes sous deux types de chargements : constant ($R = 0.5$) et variable avec surcharge (ORL = 2.0), en considérant deux longueurs initiales de fissure ($a_0 = 5$ mm et $a_0 = 10$ mm).

Les résultats montrent que les contraintes résiduelles peuvent réduire considérablement la durée de vie en fatigue, particulièrement sous chargement constant. Sous chargement variable, l'effet bénéfique de la surcharge peut être annulé par la présence de contraintes résiduelles. Par ailleurs, la longueur initiale de la fissure a un impact significatif sur la propagation de la fissure et la durée de vie totale. L'analyse a également mis en évidence l'évolution du facteur d'intensité de contrainte et du rapport de charge effectif (R_{eff}), influencés par la présence des contraintes résiduelles.

Mots-clés : Fatigue, contraintes résiduelles, soudage, chargement constant, chargement variable, fissure, durée de vie.

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1

Figure1.1: Définition de chargement cyclique d'amplitude constante	3
Figure1.2: passage d'un stade cristallographique (stade 1) à un stade non cristallographique (stade 2).	5
Figure1.3: Variation de la vitesse de propagation en fonction du facteur d'intensité de contrainte	6
Figure1.4: Exemples de cas de chargement à amplitude variable : a) périodique, b) aléatoire .	8
Figure1.5: Exemple de chargement combiné déphasé	9
Figure1.6: Effet de la corrosion sur l'endurance en fatigue des alliages d'aluminium	11
Figure1.7: Relation entre la limite d'endurance la résistance en traction pour les alliages d'aluminium	12
Figure1. 8: Soufflures et inclusions dans les soudures.....	14
Figure1. 9: Répartition des contraintes résiduelles dans les joints soudés	15

CHAPITRE 2

Figure2.1: Ordres des contraintes résiduelles	18
Figure2. 2: Contraint résiduelle longitudinale mesurée dans une plaque soudée	21
Figure2. 3: Comparaison des vitesses de propagation (a) le long de la direction du joint de soudure, (b) perpendiculaire au joint de soudure	22
Figure2. 4: distribution des contraintes résiduelles dues au soudage	23
Figure2. 5: 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) apporté chaleur	24
Figure2. 6: Effets des contraintes résiduelles sur la résistance à la fatigue d'un joint Soudé bout à bout	25
Figure2. 7: Distribution des contraintes résiduelles pour les différents types d'aciers Soudés par TIG dans le sens (a) transversale (b) longitudinale.....	26
Figure2. 8: 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	27
Figure2. 9: Relaxation des contraintes résiduelles transversales sous charge de traction quasi-statique dans des échantillons soudés S355J2G3.....	27

Figure2. 10: Comparaison de la contrainte résiduelle transversale maximale disponible au niveau du pied de soudure dans différents aciers	28
Figure2. 11: Contraintes résiduelles générées après sept passes de soudage	29
Figure2. 12: contraintes résiduelle longitudinale et transversale dues soudage dans plaque...	30

CHAPITRE3

Figure3. 1: Interface géométrie	33
Figure3. 2: Interface matériau	33
Figure3. 3: interface chargement variable ORL=2.0 et rapport de charge $R=0.5$	34
Figure3. 4: interface chargement cyclique	34
Figure3. 5: Interface contraintes résiduelles.....	35
Figure3. 6: Représentation schématique du modèle généralisé de Willenborg"	37
Figure3. 7: définition d'une surcharge (Benguediab,1988)	38
Figure3. 8: Evolution du Contraintes résiduelles en fonction de Largeur de l'éprouvette soudée (mm) pour $R=0.5$	39
Figure3. 9: modèle géométriques des éprouvettes soudées et non soudés	39

CHAPITRE4

Figure4. 1: Chargement constant pour $R=0.5$	43
Figure4. 2: Chargement variable pour ORL=2.0 et $R=0.5$	43
Figure4. 3: Effets des contraintes résiduelles et chargements cycliques sur évolution de la longueur de la fissure pour $a_0=5$ mm.....	44
Figure4. 4: Effet des contraintes résiduelles et chargements cycliques sur la vitesse de fissuration d'un joint soudé pour $a_0=5$ mm	44
Figure4. 5: Evolution du rapport "Reff" en fonction de "a" et en présence des contraintes résiduelles pour $a_0=5$ mm	45
Figure4. 6: Evolution du facteur K_r en fonction de la longueur "a"	45
Figure4. 7: Effets des contraintes résiduelles et chargements cycliques sur évolution de la longueur de la fissure pour $a_0=10$ mm.....	47
Figure4. 8: Effet des contraintes résiduelles et chargements cycliques sur la vitesse de fissuration d'un joint soudé pour $a_0=10$ mm	48
Figure4. 9: Effet des contraintes résiduelles et chargements cycliques sur la vitesse de fissuration d'un joint soudé pour $a_0=10$ mm	48

Figure4. 10: Evolution du rapport "R eff" en fonction de "a" et en présence des contraintes résiduelles pour $a_0=10\text{mm}$	49
Figure4. 11: Evolution du facteur K_r en fonction de la longueur "a"	49
Figure4. 12: Evolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycles 'N'	50
Figure4. 13: Evolution de la vitesse de fissuration en fonction longueur de fissure "a"	51
Figure4. 14: Evolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycles	52
Figure4. 15: Evolution de la vitesse de fissuration a fonction longueur de fissure "a"	52
Figure4. 16: Evolution de R_{eff} en fonction de la longueur de fissure "a"	53
Figure4. 17: Evolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycles	54
Figure4. 18: Evolution de la vitesse de fissuration a fonction longueur de fissure "a"	55
Figure4. 19: Evolution de R_{eff} a fonction longueur de fissure "a"	55

LISTEDESTABLEAUX

CHPITRE 2

Tableau 2 1: représente l'origines des contraintes résiduelles	19
--	----

CHPITRE 3

Tableau 3. 1: Paramètres influençant l'effet d'arrêt de surcharge ..	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 3. 2: Composition chimique de l'acier A645 Gr 45	40
Tableau 3. 3: Propriétés mécanique de l'acier A645 Gr 45	40
Tableau 3. 4: Paramètres du modèle de propagation Nasgro	40

Liste des abréviations et des symboles

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
$S_{\min}$	Contrainte minimale	MPa
ΔS	Variation totale de contrainte	
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}	Le facteur d'intensité de contrainte critique	MPa. $\sqrt{m}$
TIG	Procédé de soudage Tungstène inerte gaz	
N	Nombre de cycles	Cycles
$\frac{da}{dN}$	Vitesse de fissuration	m/ cycles
ΔK	Amplitude du facteur d'intensité de contrainte	MPa. $\sqrt{m}$
C	Constante de matériau	
σ_r	Contrainte résiduelle	MPa
$\sigma_{0.2}$	Contrainte à 0.2 de déformation plastique _ limite d'élasticité conventionnelle	MPa
ORL ou τ	Taux de surcharge	
CAL	Chargement constant	
K_{eff}	Facteur d'intensité de contrainte effectif	MPa. $\sqrt{m}$
$K_{\max}$	Facteur d'intensité de contrainte maximal	MPa. $\sqrt{m}$
K_r	Facteur d'intensité de contrainte normalisé	MPa. $\sqrt{m}$
$K_{\min}$	Facteur d'intensité de contrainte minimal	MPa. $\sqrt{m}$

$K_{\max(\text{eff})}$	Facteur d'intensité de contrainte maximal effectif	MPa.Sqrt(m)
R_{eff}	Rapport de charge effectif	
$K_{\min(\text{eff})}$	Facteur d'intensité de contrainte minimal effectif	MPa.Sqrt(m)
ΔK_{pic}	Variation de facteur de concentration de contrainte due aux contraintes résiduelles et à la charge appliquée dans les essais de fatigue	MPa.Sqrt(m)
$K_{\max(\text{ol})}$	Facteur d'intensité de contrainte maximal Au moment de la surcharge	MPa.Sqrt(m)
$R_p(\text{ol})$	Limite d'élasticité	MPa
$a(\text{ol})$	Longueur de la fissure au moment de la surcharge	M
SORL	Rapport d'arrêt de surcharge	
α	État de contrainte dans la direction de propagation de la fissure	
ϕ	Facteur géométrique ou paramètre D'influence dans la propagation de fissure	

Sommaire

Introduction Générale	1
Chapitre I : Généralité Sur la fissuration par fatigue	1
1 Introduction:.....	2
2 Historique:	2
3 Généralités sur la fatigue:	2
3.1 Définition :	2
3.2 Mécanisme de fissuration par fatigue :	3
3.2.1 Amorçage des fissures de fatigue :	4
3.2.2 Propagation des fissures:	4
3.2.3 Rupture finale :	6
3.3 Philosophies de conception en fatigue :	6
3.4 Types de chargements:	7
3.4.1 Amplitude constante:.....	7
3.4.2 Amplitude variable:	7
3.4.3 Notion de proportionnalité et de phase :	8
4 Facteurs influençant la durée de vie en fatigue:.....	9
4.1 Facteursmécaniques:	9
4.2 Facteursgéométriques:	9
4.3 Contraintesrésiduelles:	10
4.4 Facteurs environnementaux:.....	10
4.5 Facteurs métallurgiques :.....	11
5 Fatigue des joints soudés:	12
5.1 Fatigue des assemblages soudés:	12
5.2 Durée de vie des assemblages soudés :	13
5.3 Fatigue du joint soudé en fonction de sa forme :	13
5.4 Influencedesinclusions :	13
5.5 Influencedel'épaisseurdes tôles :	14

5.6	Effet de l'environnement sur la résistance à la fatigue :	14
5.7	Effet des contraintes résiduelles sur la résistance à la fatigue :	14
	Conclusion	15
	Chapitre II : Etat de l'art	16
1	Introduction:.....	17
2	Généralités sur les contraintes résiduelles:	17
2.1	Définition :	17
2.2	Origine des contraintes résiduelles :	17
3	Contraintes induites par le soudage:	19
3.1	Contraintes résiduelles dans les assemblages soudés :	19
4	Influence des contraintes résiduelles sur le comportement mécanique d'un ensemble soudé: .	20
4.1	Risques dus aux contraintes résiduelles :	20
5	Effets de contraintes résiduelles dues aux Soudage et chargement variable.....	21
5.1	Effet contraintes résiduelles sur la propagation des fissures dans les joints soudés :	21
5.2	Effet des contraintes résiduelles sur la résistance à la fatigue (endurance)	25
5.3	Étude des distributions des contraintes résiduelles longitudinales et transversales dues au soudage dans une plaque :	29
5.4	Conclusion.....	Erreur ! Signet non défini.
	CHAPITRE III : Méthodologie de Prédiction & Données Expérimentales	31
1	Introduction.....	32
2	Code AFGROW:.....	32
2.1	Modèle de willenborg :	35
3	Description du modèle de prédiction NASGRO:.....	38
3.1	Effet de retard dû à l'application d'une surcharge :	38
4	Géométrie et matériau d'étude:	38
4.1	Modèle géométrique :	38
	CHAPITRE IV: Résultats & Discussion	41
1	Effets des contraintes résiduelles dues au soudage sous chargements constants et variable.....	42
1.1	Effets des contraintes résiduelles dues au soudage pour $a_0 = 5 \text{ mm}$	42
1.2	Effets des contraintes résiduelles dues au soudage pour $a_0 = 10 \text{ mm}$:	46
2	Influence de la longueur initiale de fissure:	50
2.1	Chargement constant en absence des contraintes résiduelles	50

2.2	Chargement constant en présence des contraintes résiduelles :.....	51
2.3	Chargement variable en présence des contraintes résiduelles	54
	Conclusion_:	56
	Conclusion générale.....	57

Introduction Générale

Introduction Générale

Dans de nombreuses applications industrielles, les structures soudées sont omniprésentes : ponts, pipelines, navires, réservoirs sous pression, équipements mécaniques, etc. Toutefois, ces assemblages peuvent être soumis à des sollicitations cycliques.

Parmi les paramètres influençant le comportement en fatigue des joints soudés, les contraintes résiduelles induites par le soudage occupent une place prépondérante. Ces contraintes, générées lors de l'homogénéisation thermique du matériau lors du refroidissement, créent des champs de tensions internes qui interviennent sur les conditions locales de propagation de la fissure. Leur présence peut avoir un effet agrégant ou bien accessoire selon leur type (traction ou compression), leur distribution, le cas échéant leur rapport avec la sollicitation appliquée.

Pour prédire la durée de vie en fatigue des structures soudées, il est donc nécessaire de pouvoir associer les contraintes résiduelles et la sollicitation cyclique. L'utilisation d'outils de simulation numérique comme AFGROW permet désormais d'intégrer plusieurs données propres à la géométrie, au matériau, à la longueur de fissure initiale, au type de chargement, etc., afin de contribuer au traitement de ce problème.

Le manuscrit est présenté sous la forme de quatre chapitres :

- * Le premier chapitre constitue un état de l'art sur le phénomène de fatigue et les contraintes résiduelles.
- * Le deuxième chapitre consiste en un état de l'art sur l'effet des contraintes résiduelles générées par soudage sur la propagation des fissures de fatigue.
- * Le troisième chapitre présente la méthodologie de prédiction, le besoin expérimental, le matériau étudié ainsi que la modélisation AFGROW.
- * Le quatrième chapitre montre les résultats obtenus et élabore sur l'influence des contraintes résiduelles et des conditions de chargement sur la vitesse de propagation des fissures et la vie en fatigue.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet des contraintes résiduelles dues au soudage sur la fissuration par fatigue de joints soudés.

Chapitre I : Généralité Sur la fissuration par fatigue

1 Introduction:

La fissuration par fatigue est un phénomène mécanique majeur affectant la durabilité des structures soumises à des charges répétées. Même de faibles sollicitations peuvent entraîner l'apparition et la propagation de fissures, menant à la rupture. Ce chapitre présente les bases de ce phénomène à savoir ses mécanismes, types de chargements, les facteurs influents la durée de vie en fatigue, Fatigue des joints soudés.

2 Historique:

Les premiers essais de fatigue recensés remontent à 1829, lorsque Wilhelm Albert les appliqués aux chaînes de puits de mine. En 1839, Jean, Victor Poncelet introduit pour la première fois le terme “ fatigue “. En 1842, un essieu cédant sous l'effet de la fatigue entraîne la catastrophe ferroviaire de Meudon, un phénomène analyse par William Rankine. En 1852, le ministre prussien du Commerce confie à August Wöhler l'étude des ruptures d'axes d'essieux de trains, dont il présentera les résultats à l'Exposition universelle de Paris en 1867. Enfin, en 1954, Manson et Coffin approfondissent les recherches sur la fatigue oligo-cyclique, qui concerne les charges répétées proches de la limite d'élasticité du matériau.[1].

3 Généralités sur la fatigue:

Ci-dessous, la terminologie de la fatigue ainsi que le phénomène des dommages dus à la fatigue sont brièvement présentés.

3.1 Définition :

La fatigue des métaux correspond à la détérioration progressive d'un matériau sous l'effet de sollicitations mécaniques répétées, même lorsque les contraintes appliquées restent inférieures à celles causant une rupture statique. Ce concept est apparu vers 1850, après plusieurs ruptures d'axes de trains. Intrigué par ce phénomène, l'ingénieur allemand August Wöhler fut l'un des premiers à l'étudier. La méthodologie qu'il a mise au point reste encore aujourd'hui une référence dans ce domaine.[2].

L'endommagement par fatigue résulte de la nature cyclique du chargement, qui est caractérisée par des paramètres spécifiques, comme illustré dans la Figure 1.1.

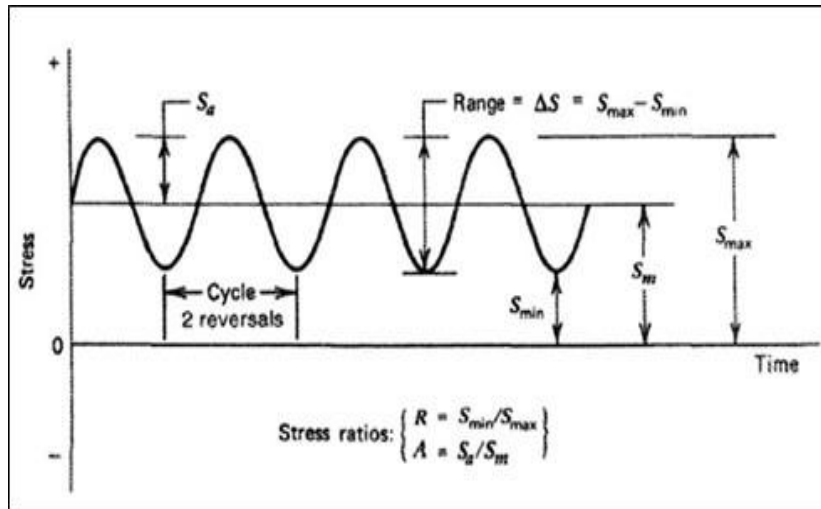


Figure1.1: Définition de chargement cyclique d'amplitude constante [2]

Sur cette figure1.1, on retrouve les paramètres clés définissant le chargement cyclique, tels que l'amplitude de la contrainte, la contrainte maximale et minimale, ainsi que le nombre de cycles jusqu'à la rupture. Ces éléments permettent d'analyser l'endommagement par fatigue et de mieux comprendre son évolution au fil du temps.

La figure présente une série de paramètres essentiels pour décrire le comportement sous chargement cyclique :

Sa : l'amplitude de contrainte, également appelée contrainte alternée.

Sm : la contrainte moyenne.

Smax : la contrainte maximale.

Smin : la contrainte minimale.

AS : la variation totale de contrainte, calculée par $S_{max} - S_{min}$, ce qui équivaut à $2 S_a$.

R : le rapport de chargement ou ratio de fatigue, défini par le rapport S_m/S_{max} .

Un chargement cyclique de fatigue est généralement exprimé en fonction de la contrainte moyenne, de la contrainte alternée, du rapport de chargement, ainsi que de la forme (sinusoïdale, triangulaire, carrée, etc).

3.2 Mécanisme de fissuration par fatigue :

Le processus d'endommagement par fatigue dans une structure ou une pièce mécanique se déroule en plusieurs étapes. Les défauts initiaux peuvent apparaître dans une zone saine avant

de se propager progressivement de manière stable jusqu'à la rupture finale. Ce phénomène suit les étapes suivantes :

- Modifications microstructurales entraînant un endommagement irréversible.
- Formation de microfissures.
- Croissance et coalescence des défauts microscopiques, conduisant à l'apparition de fissures principales.
- Propagation stable d'une fissure principale.
- Rupture finale de la structure.
- L'analyse des surfaces de rupture met en évidence trois zones distinctes :
- Le site d'amorçage de la fissure.
- La zone de propagation stable.
- La surface de rupture finale.[3]

3.2.1 Amorçage des fissures de fatigue :

Lorsqu'une éprouvette est soumise à un chargement cyclique, l'endommagement apparaît principalement à la surface, se manifestant par des modifications progressives au cours de l'essai. L'observation au microscope optique révèle l'apparition de bandes de glissement ou de déformation dès les premiers cycles de chargement. Ces bandes se multiplient et se renforcent progressivement, résistant même à un traitement thermique de restauration. Pour les éliminer, un polissage de l'éprouvette est nécessaire. Après un certain nombre de cycles, l'endommagement du matériau devient irréversible.

- * L'amorçage des fissures étant essentiellement un phénomène de surface, il est primordial de contrôler la qualité des usinages des pièces. Si nécessaire, l'application de traitements mécaniques de surface, tels que le grenaillage ou la trempe superficielle, permet d'améliorer la résistance à la fatigue.[3].

3.2.2 Propagation des fissures:

La propagation des fissures de fatigue se déroule en deux phases distinctes, que nous appelons stade 1 et stade 2 (figure 1.2).

- **Stade 1** : Les microfissures suivent les plans de glissement cristallographiques les plus favorables. Leur propagation est principalement régie par la contrainte maximale résolue. La vitesse de croissance est de l'ordre de quelques angströms par cycle.
La transition vers le stade 2 se produit lorsque la fissure commence à se propager perpendiculairement à la direction de traction.
- **Stade 2** : Ce stade se caractérise par l'apparition de stries de fatigue. La fissure subit un émoussement plus prononcé et alterne entre ouverture et fermeture. Toutefois, en raison des phénomènes irréversibles de glissement, elle ne revient pas exactement à sa position initiale [4]

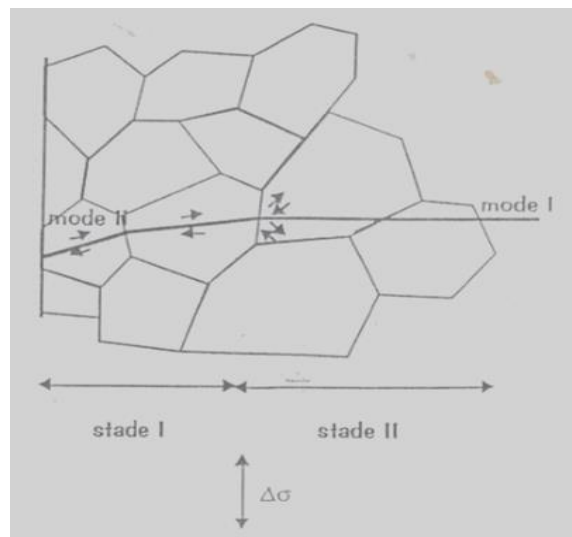


Figure1.2: passage d'un stade cristallographique (stade I) à un stade non cristallographique (stade 2).

La vitesse de propagation d'une fissure se divise en trois zones distinctes (figure 1.3).

Zone I : Le facteur d'intensité de contrainte δk_I reste inférieur au seuil critique.

Δk_{th} . Autrement dit, bien que la fissure soit initiée, elle ne progresse pas. L'amplitude de la contrainte demeure en dessous de la limite d'endurance du matériau, une caractéristique propre aux métaux ferreux, généralement fixée à environ 10^6 ou 10^7 cycles.

Zones II et III : La propagation de la fissure devient effective. En particulier, dans la zone III, la vitesse de propagation augmente de manière exponentielle, entraînant une rupture rapide du matériau.

Dans la zone 2, la vitesse de propagation demeure approximativement constante sur une échelle logarithmique. Ce taux de propagation est régi par la loi de Paris :

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (1.1)$$

Il est important de souligner que la vitesse de propagation d'une fissure peut aussi être influencée par d'autres facteurs non pris en compte dans le modèle de Paris, comme le rapport de charge "R" [5, 6]. Bien que cet effet soit généralement négligeable dans la zone II, plusieurs études [7, 8] ont proposé des variantes empiriques de la loi de Paris afin d'intégrer cette influence.

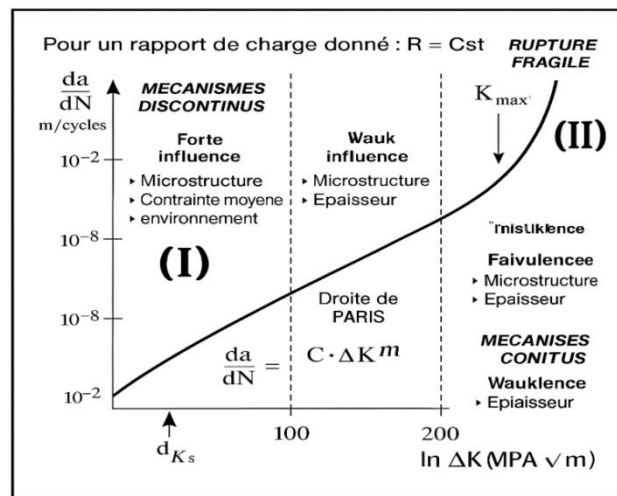


Figure1.3: Variation de la vitesse de propagation en fonction du facteur d'intensité de contrainte [9]

3.2.3 Rupture finale :

Au stade III, la rupture devient instable, car la matière résiduelle n'est plus en mesure de supporter l'effort appliqué. La rupture instable ou finale est caractérisée par le facteur d'intensité de contrainte critique K_{IC} .

3.3 Philosophies de conception en fatigue :

La conception d'une pièce soumise à la fatigue repose sur deux aspects fondamentaux : la philosophie de conception et la méthode de conception. La philosophie de conception détermine l'objectif visé, influençant ainsi la durée de vie de la pièce et son niveau d'optimisation. On distingue cinq grandes philosophies de conception, décrites ci-dessous [2, 10,11] :

- * **Vie infinie (Infinite life)** : les contraintes appliquées restent systématiquement inférieures à la limite d'endurance ou à la limite d'endurance conventionnelle, assurant ainsi une durée de vie quasi-infinie.

- * **Vie sécuritaire (Safe life)** : la conception est réalisée pour une durée de vie finie, la contrainte maximale étant définie en fonction de la durée de vie souhaitée. Celle-ci correspond généralement à la phase d'amorçage de fissure. Cette approche est couramment utilisée dans les codes de dimensionnement en fatigue [12,13] ainsi que dans l'industrie automobile [14].
- * **Rupture sécuritaire (Fail safe)** : développée par l'industrie aéronautique, cette approche considère qu'une fissuration limitée ou la rupture de certaines pièces ne remet pas en cause l'intégrité de l'ensemble de la structure. Elle implique des inspections régulières et repose sur la connaissance des caractéristiques de propagation des fissures dans le matériau utilisé.
- * **Tolérance au dommage (Damage tolerant)** : évolution de l'approche de rupture sécuritaire, cette philosophie prend en compte la présence de fissures dès la conception, notamment aux emplacements critiques. La taille initiale des fissures est définie comme la longueur maximale non détectable par les méthodes d'inspection. Des contrôles périodiques sont nécessaires pour surveiller leur propagation jusqu'à la taille critique prévue par la mécanique de la rupture.
- * **Pratique courante (Good practice)** : approche basée sur des méthodes éprouvées en conception en fatigue, sans toutefois permettre une optimisation avancée des pièces. Les méthodes de conception associées seront détaillées dans la section 2.6.

3.4 Types de chargements:

Les chargements responsables de l'endommagement par fatigue sont de nature cyclique et peuvent présenter une amplitude constante ou variable. De plus, ils peuvent être soit proportionnels, soit non proportionnels.

3.4.1 Amplitude constante:

Un chargement cyclique est qualifié d'amplitude constante lorsque les contraintes maximales, minimales et moyennes demeurent inchangées au fil du temps. Ce type de chargement se rencontre notamment dans les machines rotatives fonctionnant en régime établi ou lors des cycles de pressurisation et dépressurisation d'une cabine d'avion. La Figure 1.1 illustre un exemple de ce type de chargement.

3.4.2 Amplitude variable:

Un chargement est dit à amplitude variable lorsque les valeurs des contraintes maximales, minimales et moyennes évoluent d'un cycle à l'autre. Ce type de chargement peut néanmoins être périodique, c'est-à-dire qu'une séquence de cycles d'amplitude variable se répète à

intervalles réguliers. C'est le cas, par exemple, du cycle décollage/vol/atterrissage subi par un train d'atterrissage d'avion, illustré à la Figure 1.4a). À l'inverse, un chargement peut être totalement aléatoire, sans ordre précis dans la succession des cycles.

Cela se produit notamment dans le comportement d'un véhicule automobile (Figure 1.4b) ou lors d'un tremblement de terre.

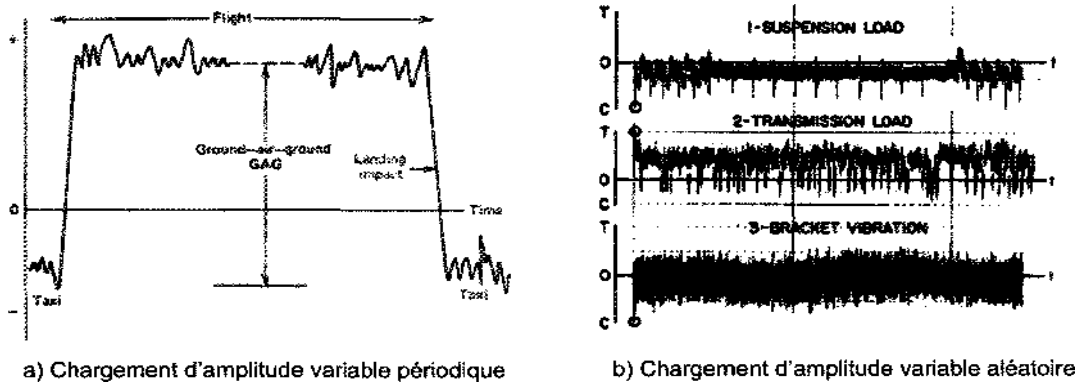


Figure 1.4: Exemples de cas de chargement à amplitude variable : a) périodique, b) aléatoire [2]

3.4.3 Notion de proportionnalité et de phase :

Un chargement est qualifié de proportionnel lorsque les directions des axes des contraintes principales restent constantes. Un chargement uni axial à orientation fixe est généralement considéré comme proportionnel. À l'inverse, un chargement est dit non proportionnel lorsque les axes des contraintes principales varient au cours du temps. Ce phénomène se produit notamment lorsque l'orientation des forces et des moments appliqués sur une pièce change [15].

La notion de phase intervient lorsque plusieurs sollicitations agissent simultanément sur une pièce. Par exemple, un arbre de transmission peut être soumis à des efforts de torsion et de flexion combinés. Si les contraintes maximales et minimales de ces deux chargements surviennent au même instant, le chargement est dit en phase. En revanche, si ces contraintes atteignent leurs valeurs extrêmes à des moments différents, le chargement est considéré déphasé. La Figure 1.5 illustre un exemple de chargement combiné flexion/torsion déphasé.

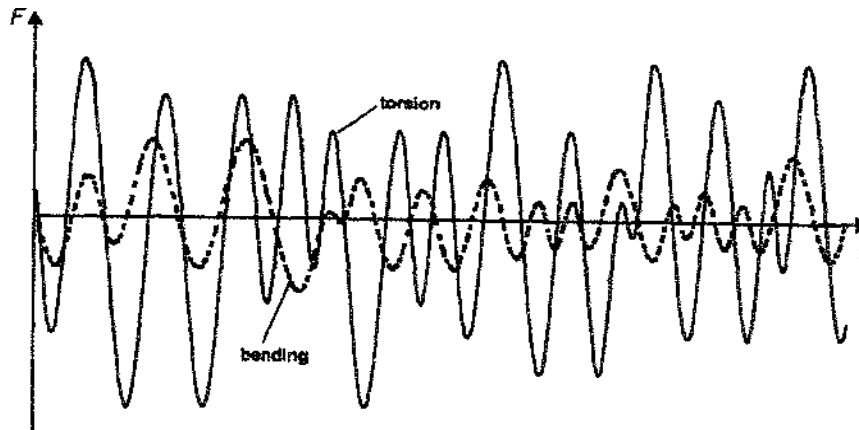


Figure1.5: Exemple de chargement combiné déphasé [16]

4 Facteurs influençant la durée de vie en fatigue:

La durée de vie en fatigue d'une composante est influencée par de nombreux facteurs. Il est essentiel de les identifier et de les comprendre afin d'optimiser la conception. Les principaux facteurs, issus des références [2, 11, 17], sont présentés ci-dessous.

4.1 Facteurs mécaniques:

Le mode de sollicitation joue un rôle clé dans la durée de vie en fatigue. L'un des premiers paramètres à prendre en compte est l'effet de la contrainte moyenne : en général, plus cette contrainte est élevée en traction, plus la durée de vie est réduite. Pour modéliser cet effet, plusieurs relations ont été proposées, notamment celles de Goodman et de Soderbergh[18].

4.2 Facteurs géométriques:

La durée de vie en fatigue est fortement influencée par le facteur d'entaille et toute autre source de concentration de contrainte. Comme mentionné précédemment, l'amorçage des fissures se produit généralement dans les zones où les contraintes locales sont élevées, d'où l'importance de les minimiser. Des formules paramétriques permettent d'évaluer les facteurs de concentration de contrainte pour estimer la sévérité d'une géométrie donnée. De plus, l'analyse par la méthode des éléments finis, avec un maillage adapté, constitue un outil efficace pour les quantifier.

Un autre paramètre essentiel est le **facteur d'échelle** : l'augmentation des dimensions d'une pièce tend à réduire sa résistance à la fatigue. Cela s'explique par l'aspect statistique de l'amorçage des fissures : une pièce plus grande a une probabilité accrue de contenir des défauts internes susceptibles de favoriser l'apparition d'une fissure. Ce phénomène doit être pris en compte, notamment lorsqu'une courbe S-N obtenue à partir d'éprouvettes de petite taille est utilisée pour le dimensionnement d'une pièce de grande dimension.

L'état de surface influence également la durée de vie en fatigue et repose sur trois aspects :

- * **L'aspect géométrique** : les marques d'usinage peuvent induire des concentrations de contraintes.
- * **L'aspect mécanique** : l'écrouissage superficiel résultant d'un procédé de mise en forme peut modifier les propriétés du matériau.
- * **L'aspect métallurgique** : des altérations de la microstructure en surface peuvent se produire lors de la mise en œuvre.

4.3 Contraintes résiduelles:

Les contraintes résiduelles désignent les contraintes présentes dans une pièce en l'absence de toute sollicitation extérieure. Elles résultent généralement de procédés de fabrication, soit de manière involontaire, soit volontairement par le biais de traitements de surface spécifiques.

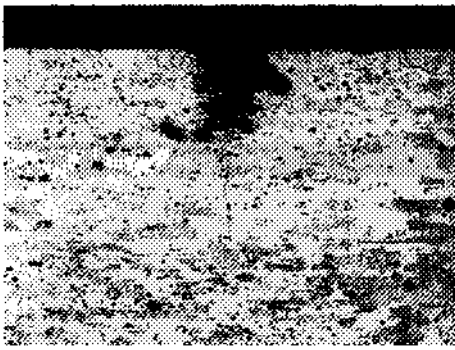
Ces contraintes s'ajoutent à celles induites par les charges appliquées et peuvent influencer la durée de vie d'une pièce de manière positive ou négative. Les contraintes résiduelles de traction tendent à réduire la durée de vie en fatigue, mais elles peuvent être atténuées par des traitements thermiques appropriés, tels que le recuit de détente. À l'inverse, les contraintes résiduelles de compression, générées par des procédés comme le grenaillage, améliorent considérablement la résistance à la fatigue.

Des essais de fatigue réalisés en laboratoire chez Devine ! ont montré que le grenaillage des soudures permet de doubler la durée de vie moyenne des cadres de vélo. Ces résultats sont en accord avec les observations rapportées dans[11].

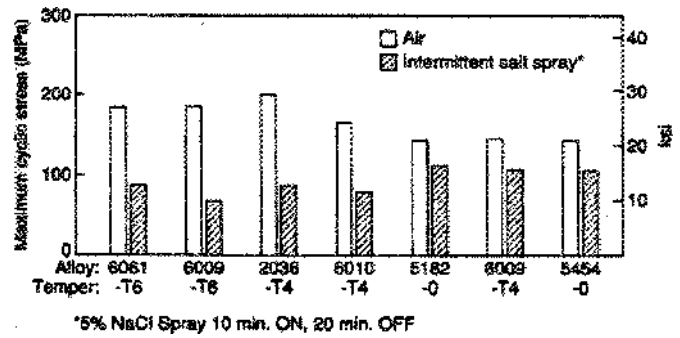
4.4 Facteurs environnementaux:

Pour les alliages d'aluminium, une élévation de température entraîne une réduction de l'endurance en fatigue. Des essais menés sur différents alliages ont montré qu'à 200 °C, la limite d'endurance représente environ 50 % de celle mesurée à température ambiante [11]. Cependant, cette diminution dépend de la nuance de l'alliage et du traitement thermique appliqué. À l'inverse, lorsque la température descend sous la température ambiante, l'endurance en fatigue des alliages d'aluminium a tendance à s'améliorer.

Un environnement corrosif, tel qu'une atmosphère agressive ou un milieu salin, contribue également à la diminution de l'endurance en fatigue. Bien que la corrosion affecte principalement la surface d'une pièce sans altérer le métal de base, elle engendre la formation de piqûres servant de sites d'amorçage pour les fissures (voir Figure 1.6a). De plus, un environnement corrosif accélère généralement le taux de propagation des fissures, avec des effets variables selon la nature de l'alliage, comme illustré à la Figure 1.6b.



a) Amorçage d'une fissure en fond de piqure de corrosion



b) Effet de l'environnement sur l'endurance en fatigue axiale à 10^6 cycles

Figure1.6: Effet de la corrosion sur l'endurance en fatigue des alliages d'aluminium [11].

4.5 Facteurs métallurgiques :

Les propriétés mécaniques intrinsèques d'un matériau, notamment sa résistance à la traction, influencent directement sa durée de vie en fatigue. De manière générale, plus ces propriétés sont élevées, plus la limite d'endurance est importante. De nombreux chercheurs ont cherché à établir un lien entre la limite d'endurance et les propriétés mécaniques en traction. Pour les alliages d'aluminium durcis par précipitation, il a été observé qu'en moyenne, la limite d'endurance conventionnelle à 5×10^8 cycles représente environ 35 % de la résistance à la traction. En revanche, pour les alliages non traitables thermiquement, ce rapport est d'environ 50 %. Ces résultats sont illustrés à la Figure 1.7. Ces facteurs servent uniquement à des estimations préliminaires, mais la valeur réelle de la limite d'endurance mesurée expérimentalement reste préférable pour un dimensionnement précis.

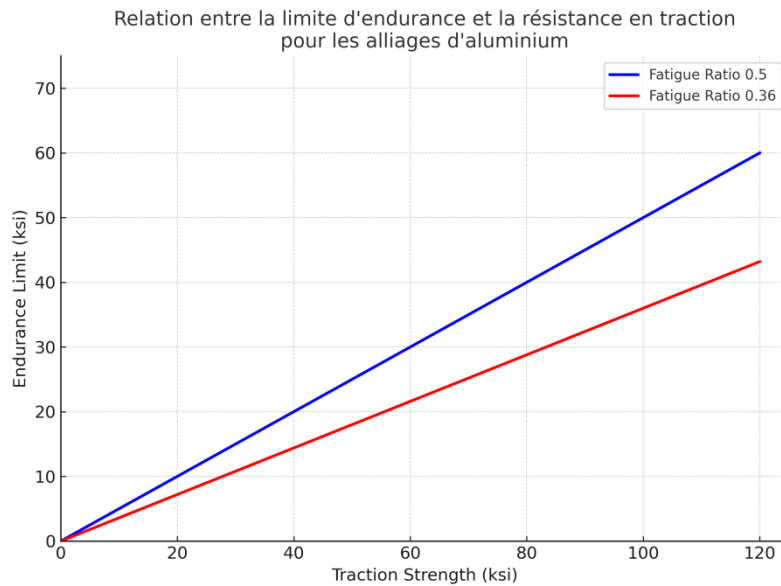


Figure1.7: Relation entre la limite d'endurance la résistance en traction pour les alliages d'aluminium [19]

La taille des grains influence également la résistance à la fatigue. En général, des grains fins améliorent l'endurance en fatigue en limitant la déformation locale le long des plans de glissement, ce qui réduit le glissement irréversible. De plus, une structure à grains fins offre un plus grand nombre de joints de grains, qui agissent comme barrières à la propagation des fissures Trans granulaires [3]. Toutefois, à haute température, cet effet peut être atténué en raison des interactions entre la fatigue et le fluage. Les défauts métallurgiques, tels que les inclusions et les porosités, créent des zones de concentration de contraintes locales, favorisant ainsi l'amorçage des fissures. Par conséquent, leur présence a un effet néfaste sur l'endurance en fatigue [3].

5 Fatigue des joints soudés:

Cette section traite spécifiquement de la fatigue des joints soudés. Elle aborde d'abord les principaux procédés de soudage utilisés pour l'aluminium, puis examine les facteurs influençant la durée de vie des joints soudés ainsi que les méthodes permettant de l'améliorer.

5.1 Fatigue des assemblages soudés:

L'analyse des structures soudées suit des principes similaires à ceux des autres types de structures. Toutefois, pour assurer une conception optimale, il est essentiel d'éviter certains mécanismes en sélectionnant judicieusement le métal et en déterminant les dimensions appropriées. L'amorçage et la propagation des fissures de fatigue surviennent généralement à

proximité de la soudure au cours de la durée de vie en service. La résistance à la fatigue d'un joint soudé ne dépend pas principalement de la résistance du métal de base, mais plutôt des caractéristiques géométriques, tant globales que locales, du joint. [20]

5.2 Durée de vie des assemblages soudés :

Il n'existe pas de méthode permettant d'évaluer la durée de vie des assemblages soudés à partir des résultats obtenus sur des éprouvettes sans soudure. Plusieurs raisons expliquent cette difficulté:

- Les formes des cordons de soudure sont insuffisamment définies pour permettre une estimation précise des contraintes dans les zones critiques, comme les bords et la racine du cordon.
- Les contraintes résiduelles sont très élevées, atteignant des valeurs proches de la limite d'élasticité, rendant complexe le calcul de la contrainte moyenne.
- Lors de la rupture, la proportion du nombre de cycles d'amorçage par rapport au nombre total de cycles est plus faible que pour des assemblages non soudés.

Pour estimer la durée de vie des assemblages soudés, des essais sont réalisés sur des éprouvettes soudées. Ces essais doivent être effectués sur des assemblages représentatifs des structures concernées, avec un matériau identique et dans des conditions de réalisation similaires. Ils suivent les principes généraux des essais de fatigue. Après un nombre relativement faible de cycles, une fissure apparaît dans une zone où l'effet d'entaille est maximal, généralement au bord ou à la racine du cordon. En poursuivant l'essai, la fissure se propage jusqu'à ce que l'éprouvette se rompe ou ne puisse plus supporter l'effort nominal.[20]

5.3 Fatigue du joint soudé en fonction de sa forme :

La durée de vie en fatigue des joints soudés est fortement influencée par la concentration de contraintes au pied du cordon, liée à la géométrie de la soudure [21]. L'amorçage des fissures peut être provoqué par la forme même du cordon ou par la présence de défauts internes (manque de pénétration, soufflures) ou externes (caniveaux, inclusions de laitier). Plusieurs paramètres influencent ainsi la résistance à la fatigue des joints soudés.

5.4 Influence des inclusions :

La nocivité des inclusions dépend principalement de la présence d'hydrogène, qui joue un rôle clé dans la réduction de l'endurance des joints soudés, notamment en lien avec la porosité [22]. Les soufflures et les inclusions de laitier ont un impact négatif sur les propriétés de fatigue.

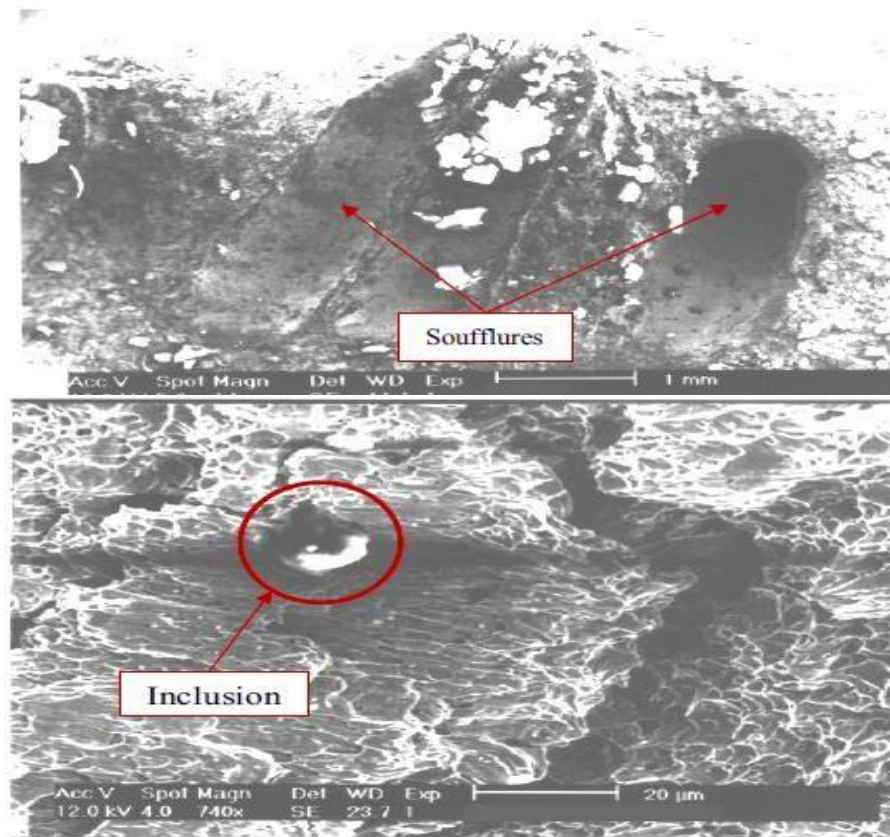


Figure1. 8: Soufflures et inclusions dans les soudures.

5.5 Influence de l'épaisseur des tôles :

L'augmentation de l'épaisseur des tôles réduit la résistance à la fatigue lorsqu'une fissure se propage à partir du pied d'un joint soudé. Cela s'explique par une élévation des concentrations de contraintes résiduelles dans les sections concernées.[23]

5.6 Effet de l'environnement sur la résistance à la fatigue :

L'environnement joue un rôle déterminant dans la durée de vie en fatigue d'un assemblage soudé, souvent en la réduisant. Des facteurs tels que la température, l'humidité et l'emplacement géographique influencent cette résistance. En particulier, les milieux contenant de l'eau de mer accélèrent la propagation des fissures, entraînant une diminution de la durée de vie en fatigue [23].

5.7 Effet des contraintes résiduelles sur la résistance à la fatigue :

Le soudage génère des contraintes résiduelles de traction élevées dans et autour du cordon de soudure, en raison de la contraction du métal lors du refroidissement. Ces contraintes, pouvant atteindre la limite d'élasticité du métal de base, diminuent la résistance à la fatigue des structures et composants soudés [24].

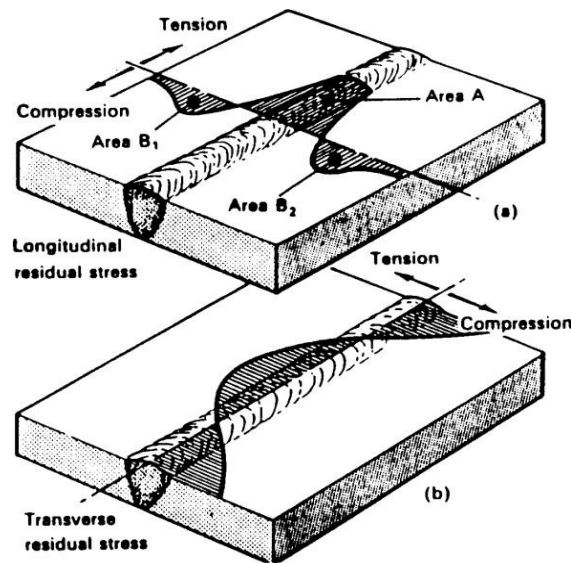


Figure1. 9: Répartition des contraintes résiduelles dans les joints soudés

Conclusion

La fissuration par fatigue représente un enjeu majeur dans la conception et la maintenance des structures soumises à des sollicitations cycliques. Ce phénomène, souvent insidieux, peut conduire à des défaillances graves s'il n'est pas correctement pris en compte. À travers ce chapitre, nous avons mis en lumière les mécanismes fondamentaux de la formation et de la propagation des fissures, les différents types de fatigue, ainsi que les facteurs qui influencent leur apparition.

Une bonne compréhension de ces notions est essentielle pour anticiper les risques de rupture, prolonger la durée de vie des composants, et assurer la sécurité des systèmes. Cette base théorique constitue un socle indispensable pour aborder les études de cas, les approches expérimentales et les solutions d'ingénierie qui seront développées dans les chapitres suivants.

Chapitre II : Etat de l'art

1 Introduction:

Ce chapitre examine l'impact des contraintes résiduelles dues au soudage et des contraintes issues de chargements variables sur les structures soudées. Les contraintes résiduelles, causées par des gradients thermiques et des transformations métallurgiques, influencent la durabilité, la résistance à la fatigue et la stabilité des assemblages. En parallèle, les chargements variables, souvent cycliques, interagissent avec ces contraintes, amplifiant les risques de fatigue et de fissuration. L'objectif est de comprendre les mécanismes et effets combinés de ces contraintes sur le comportement des matériaux et structures.

2 Généralités sur les contraintes résiduelles:

2.1 Définition :

Les contraintes résiduelles sont des tensions internes qui subsistent dans un matériau après sa fabrication, en l'absence de forces externes ou de variations thermiques. Elles résultent fréquemment de déformations plastiques ou de modifications de volume liées aux processus de fabrication, aux traitements technologiques ou aux conditions d'utilisation. Malgré les progrès des outils de calcul modernes, la prédiction et la modélisation de ces contraintes demeurent plus difficiles que celles des contraintes en service. C'est pourquoi il est indispensable de recourir à des méthodes expérimentales fiables pour les évaluer et obtenir des informations précises à leur sujet. Ces contraintes se divisent en trois catégories distinctes [25, 26].

2.2 Origine des contraintes résiduelles :

Les contraintes résiduelles sont des contraintes multiaxiales, statiques et en état d'auto-équilibre. En général, les sources des contre-indications sont principalement localisées dans les couches superficielles du matériau [27]. Les déformations associées aux propriétés résiduelles initiales peuvent appartenir à différents domaines, et sont classées en trois catégories (figure 35) :

- **Contraintes résiduelles de premier ordre** : elles sont homogènes sur de vastes régions du matériau, s'équilibrent à l'échelle macroscopique et génèrent des déformations observables à grande échelle. [28]

- **Contraintes résiduelles de deuxième ordre** : elles sont homogènes à l'intérieur d'un grain ou d'une phase, s'équilibrent entre plusieurs grains et induisent des déformations à l'échelle du grain.[28]
- **Contraintes résiduelles de troisième ordre** : appelées contraintes résiduelles microscopiques hétérogènes, elles s'équilibrent à l'intérieur d'une portion de grain et sont associées aux déformations du réseau cristallin. [28]

Le champ des contraintes résiduelles résulte de la superposition des contraintes des trois ordres.

$$\sigma_r = \sigma_r^I + \sigma_r^{II} + \sigma_r^{III} \quad (2.1)$$

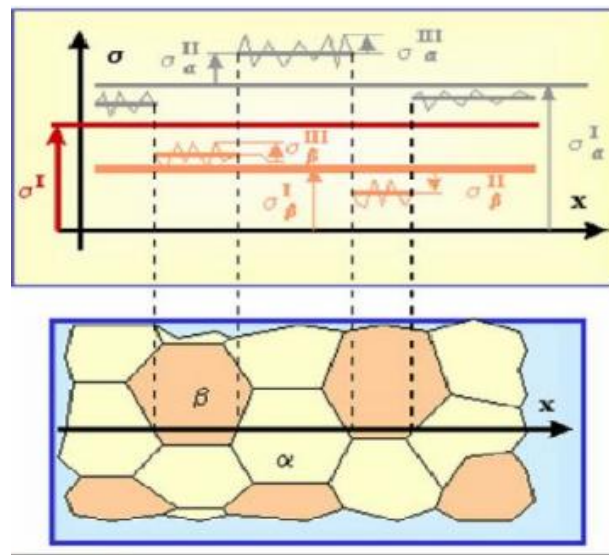


Figure2.1:Ordres des contraintes résiduelles [28]

Les contraintes résiduelles proviennent de diverses sources [29-30]. Parmi celles-ci, on peut mentionner les résidus précontractuels, les traitements thermiques, les traitements thermochimiques ainsi que les préchargements mécaniques. L'ensemble de ces facteurs, qui génèrent généralement des contraintes de compression élevées, est synthétisé dans le tableau 2.1.

Tableau 2 1: Origines des contraintes résiduelles [28]

Type de traitement	Origines principales	Exemples de traitements
Mécanique	Déformation plastique locale	Grenaillage, martelage, galetage, expansion, préchargement, etc
Thermique	Dilatation différentielle et transformations de phase	Trempe, trempe superficielle
Thermochimique	Diffusion, dilatation et transformation de phase	Cémentation, nitruration.....

3 Contraintes induites par le soudage:

3.1 Contraintes résiduelles dans les assemblages soudés :

Il existe dans tous les assemblages soudés des contraintes résiduelles soit de traction ou de compression, dont l'importance peut avoir des conséquences néfastes pour la sécurité d'un assemblage soudé. On peut avoir quatre types de contraintes :

a. contraintes résiduelles directes : Elles sont dues aux déformations de retrait empêchées dans le joint soudé, ces contraintes n'affectent que la zone au voisinage immédiat du cordon de soudure. Il est impossible de les éviter ; elles résultent de la répartition non uniforme du flux thermique dans l'assemblage soudé.

b. contraintes résiduelles indirectes, ou de bridage : Elles sont dues au bridage de l'ensemble soudé, qui s'oppose aux dilatations et aux retraits. Ces contraintes affectent l'étendue de chaque élément de l'ensemble de manière uniforme.

c. contraintes parasites (extérieures à l'opération de soudage) : Ce sont celles qui s'exercent sur le joint soudé pendant l'opération de soudage par exemple, masse de l'ensemble en porte à faux pendant le soudage. On peut les réduire considérablement, sinon les annuler, en adoptant des dispositions en conséquence.

d. contraintes résiduelles directes longitudinales dans les assemblages bout à bout : Dans le cas des soudures bout à bout on peut considérer que la valeur des contraintes longitudinales atteint la limite d'élasticité du matériau dans une zone égale environ à 6 fois celle du métal

fondu. Pendant le soudage, le métal de base qui se trouve dans la zone du cordon de soudure est portée à haute température, et sa dilatation est entravée par les zones où le métal est pratiquement froid ; les fibres longitudinales sont refoulées à chaud et exercent, après refroidissement, une traction sur le métal de base. Après soudage le joint se trouve tendu dans le sens longitudinal, ainsi dans le cordon de soudure et dans ses abords [31, 32].

4 Influence des contraintes résiduelles sur le comportement mécanique d'un ensemble soudé:

4.1 Risques dus aux contraintes résiduelles :

a. Structures soumises au flambement (ou flambage) :

Les contraintes résiduelles, et surtout les déformations entraînent une diminution des charges admissibles sur les éléments soumis au flambement, les coefficients de flambement sont plus importants pour les ensembles soudés que pour les laminés ; les contraintes résiduelles peuvent donc réduire la valeur de la charge admissible, et se combiner avec les contraintes de service et, le cas échéant, avec des contraintes parasites dues à l'exécution ou au montage de l'ensemble.

b. Structures soumises au risque de rupture fragile :

Lorsqu'un élément d'une structure est soumis à des contraintes multidirectionnelles de traction, il ne peut se déformer plastiquement. Dans ce cas, si la rupture se produit elle a lieu brutalement par décohesion (rupture fragile). Parmi les facteurs qui rendent un acier sensible au risque de rupture fragile on note entre autre le niveau des contraintes de traction auxquelles est soumis le métal. Les contraintes résiduelles du soudage, qui sont très souvent multidirectionnelles viennent s'additionner aux contraintes de service qui peuvent conduire à une rupture fragile. Il est donc très important, à chaque fois que cela est possible de diminuer au maximum l'importance des contraintes résiduelles, Surtout si le joint soudé doit travailler à la fatigue [31].

5 Effets de contraintes résiduelles dues aux Soudage et chargement variable

5.1 Effet contraintes résiduelles sur la propagation des fissures dans les joints soudés :

. L'influence des contraintes résiduelles transversales et longitudinales sur la propagation des fissures de fatigue de l'alliage d'aluminium 2219-T851 a été analysée par **Galatolo et Lanciotti [33]**. La répartition des contraintes résiduelles longitudinales est illustrée par la figure 2.2. Quant à la figure 2.3, elle présente les vitesses de propagation des fissures dans la zone de fusion et la zone affectée thermiquement, examinées à l'aide de deux types d'éprouvettes : l'éprouvette C(T) et l'éprouvette CC(T), dans le sens du soudage (figure 2.3a) et perpendiculairement à celui-ci (figure 2.3b). La distinction principale repose sur la distribution des contraintes résiduelles. Lorsque les fissures se propagent dans le sens du soudage, les contraintes résiduelles perpendiculaires à la fissure restent très faibles. En revanche, pour les fissures se propageant perpendiculairement au joint soudé, les vitesses de propagation des fissures pour l'éprouvette C(T) sont nettement inférieures à celles observées avec l'éprouvette CC(T) (figure 2.3b).

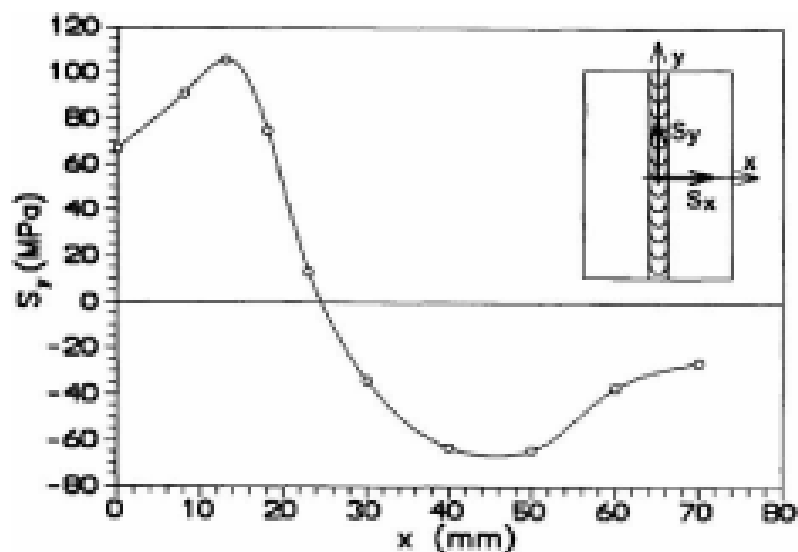


Figure2. 2: Contraint résiduelle longitudinale mesurée dans une plaque soudée[33]

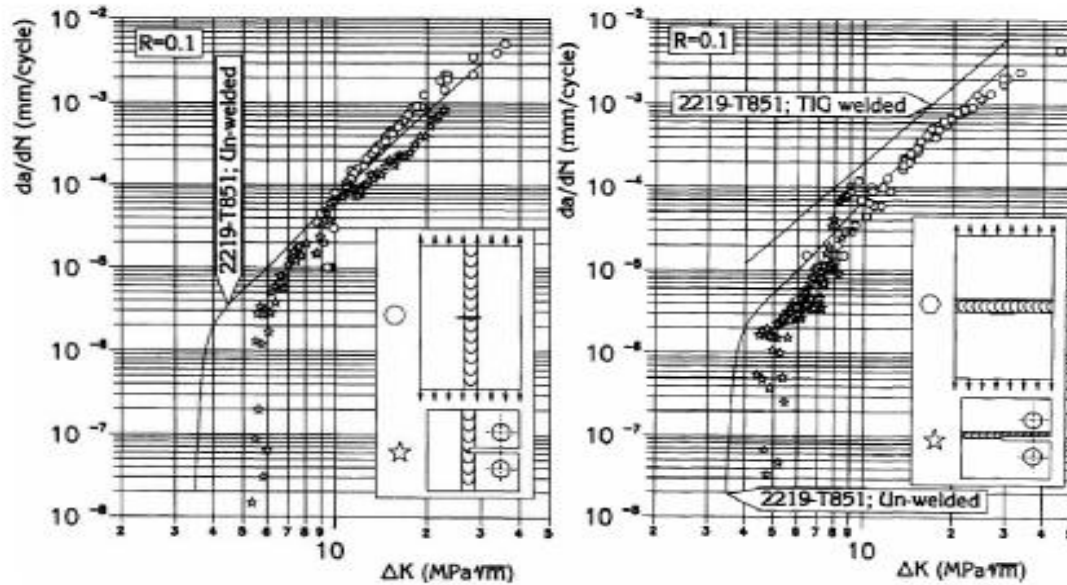


Figure2. 3: Comparaison des vitesses de propagation (a) le long de la direction du joint de soudure, (b) perpendiculaire au joint de soudure [33]

Le seuil de non-fissuration en fatigue et les caractéristiques des zones à vitesse de propagation élevée ont été analysés sur différents types de joints soudés par **Ohta et al. [34]**. La distribution des contraintes résiduelles induites est schématiquement illustrée dans la figure 2.4, dans le sens longitudinal. L'impact du rapport de charge sur la fissuration des joints soudés a été étudié en tenant compte des contraintes résiduelles de tension (figure 2.5a). Aucune variation n'a été observée dans la zone de propagation des fissures de fatigue (métal fondu et zone affectée thermiquement), ce qui montre que l'évolution des vitesses de propagation n'est pas influencée (figure 2.5b). De plus, les paramètres tels que les changements de la nature des aciers, la méthode de soudage et le flux thermique n'affectent pas les vitesses de propagation des fissures dans les joints soudés (figures 2.5c, 2.5d et 2.5e). Ces résultats indiquent que les propriétés de propagation des fissures de fatigue des joints soudés restent inchangées, même en cas de modification de la microstructure ou des propriétés mécaniques [34].

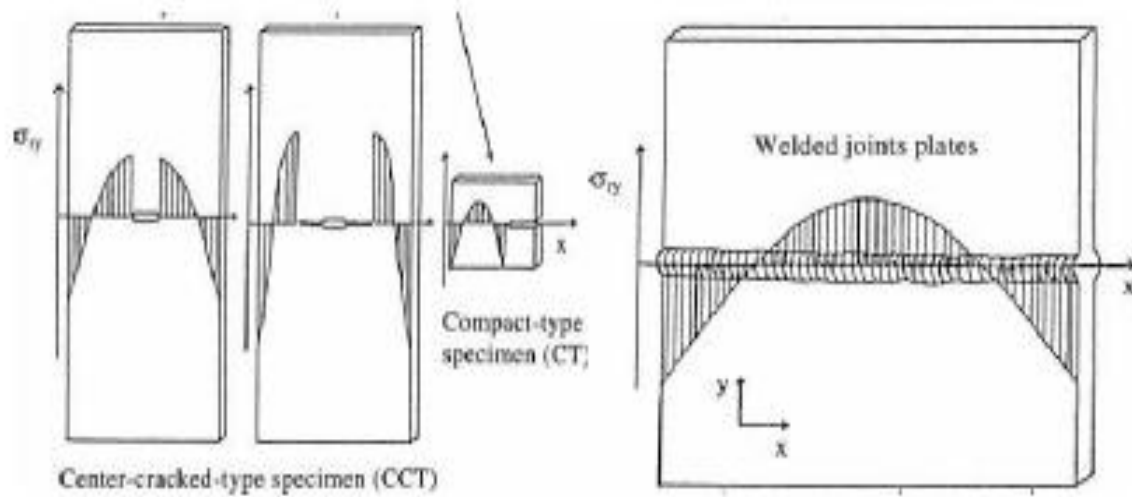
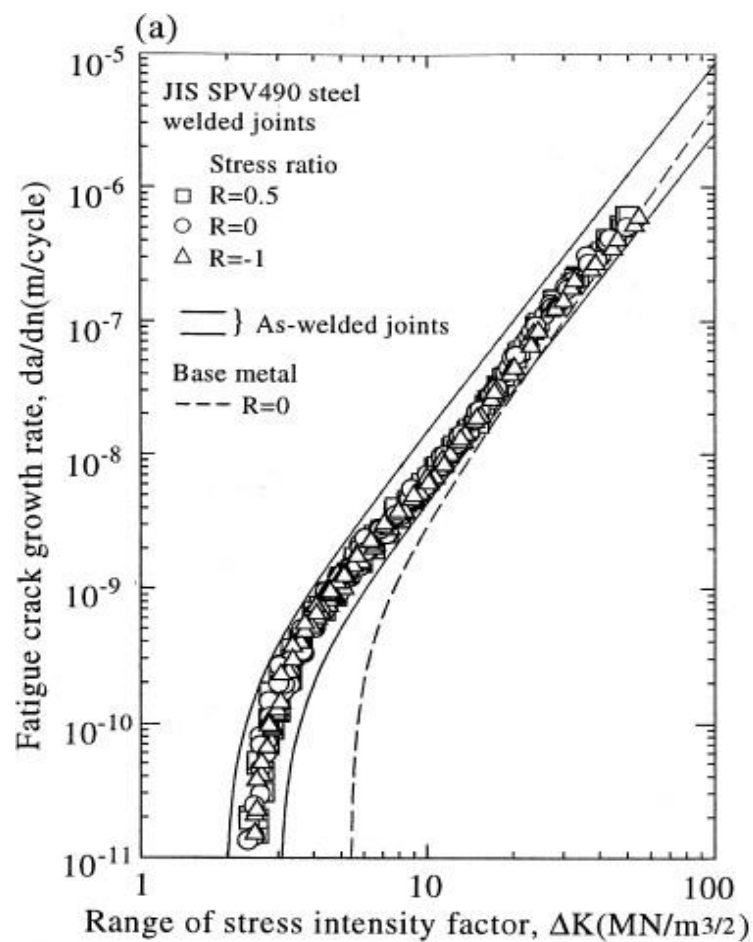


Figure2. 4:Distribution des contraintes résiduelles dues au soudage [34]



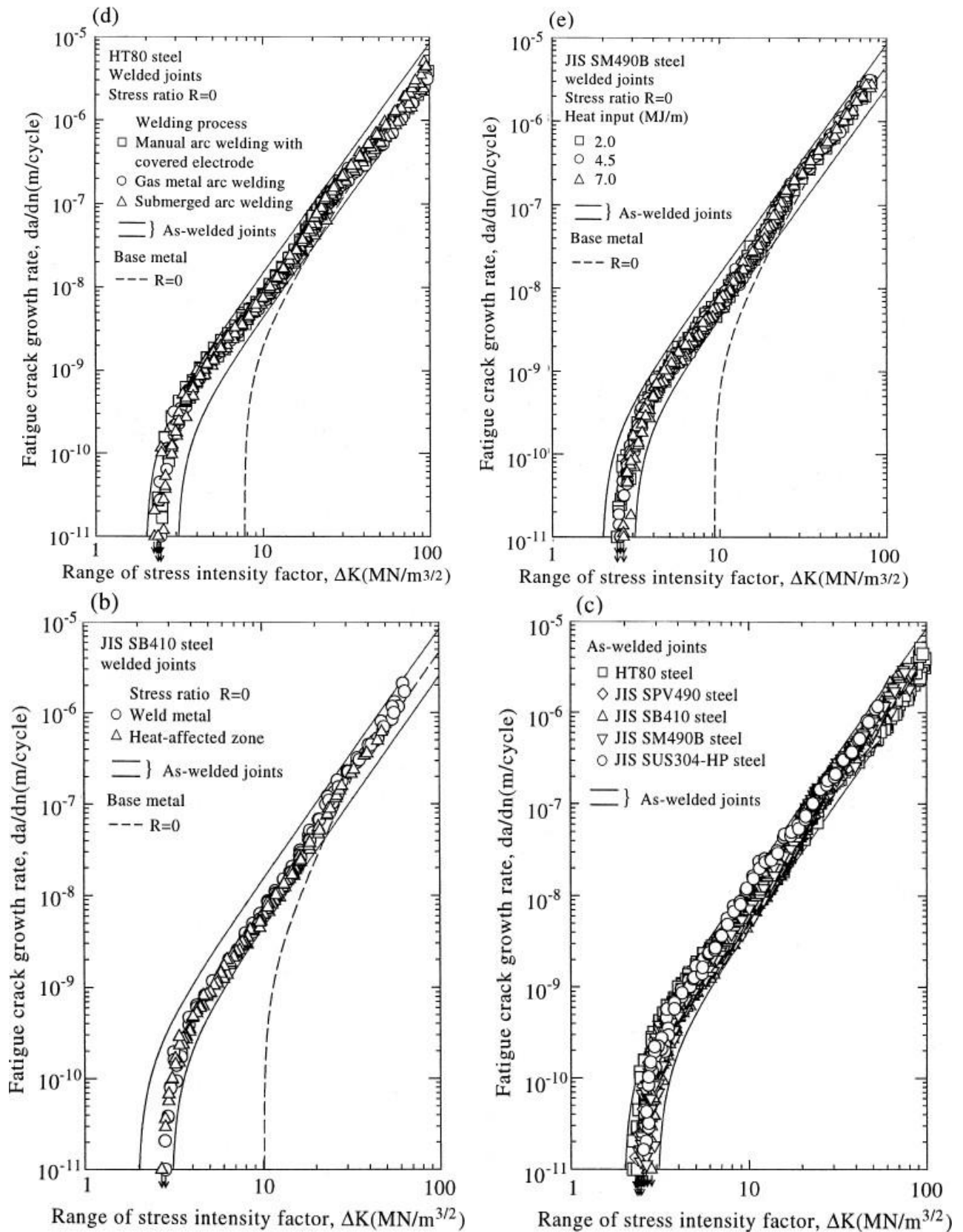


Figure2. 5: Courbes de propagations des fissures de fatigue pour des joints soudés sous l'influence des paramètres (a) rapport de charge, (b) zone de fissuration, (c) différent typed'aciers, (d) procédés de soudage, (e) apporté chaleur [34]

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

Nguyen et Waheb [35] ont développé un modèle mathématique permettant de prédire l'influence des paramètres géométriques du joint de soudure (rayon du pied du cordon, défaut de dépouille le long du joint, angle de flanc, épaisseur de la plaque, désalignement), ainsi que celle des contraintes résiduelles, sur la résistance à la fatigue et la durée de vie en fatigue sous un chargement combiné de traction et de flexion. Leur étude a notamment porté sur l'effet des contraintes résiduelles dans les joints soudés bout à bout.

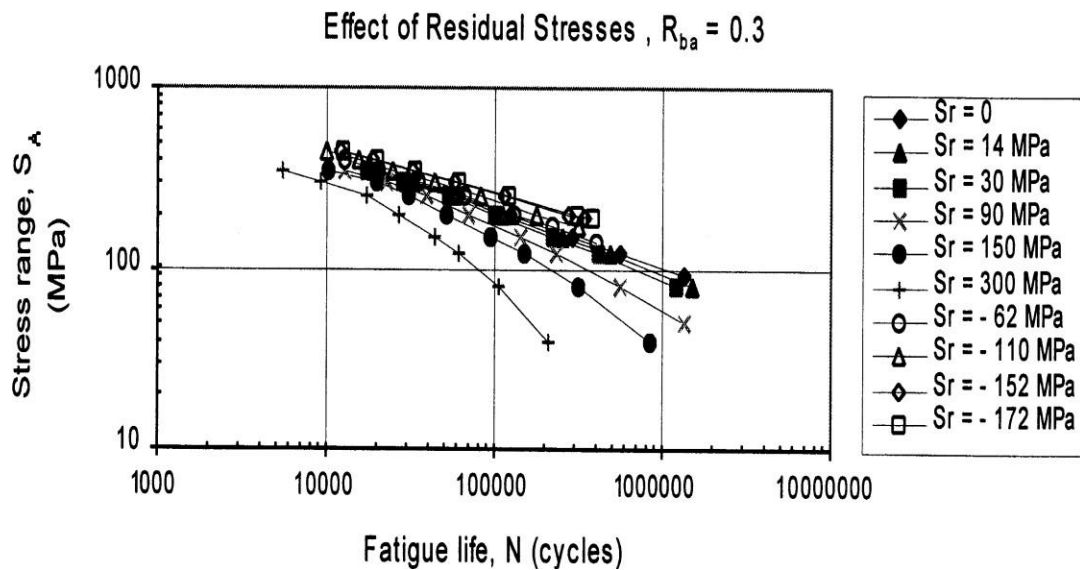


Figure2. 6: Effets des contraintes résiduelles sur la résistance à la fatigue d'un joint Soudé bout à bout [35]

Les résultats montrent que la présence de contraintes résiduelles de compression améliore la résistance à la fatigue, tandis que les contraintes résiduelles de traction la diminuent (figure 2.6). Ces observations sont en accord avec les conclusions de nombreuses études antérieures et récentes menées par différents chercheurs [35-36].

Dans son étude, Farajian [37] a analysé l'évolution des contraintes résiduelles dans différents types d'aciers, dont la limite d'élasticité varie de 300 à 1200 MPa, soudés par le procédé TIG en configuration bout à bout. La répartition des contraintes résiduelles, tant dans le sens longitudinal que transversal, est illustrée par la figure 2.7. Au début des essais de fatigue, une relaxation des contraintes résiduelles a été observée au centre de la zone de fusion ainsi qu'au pied du cordon de soudure. Toutefois, après quelques cycles de chargement, aucune relaxation supplémentaire des contraintes n'a été constatée (figure 2.8).

Parmi les résultats les plus significatifs de l'étude de Farajian (2013)[37], trois figures méritent une attention particulière quant à l'impact du chargement mécanique sur les

contraintes résiduelles de soudage. (Figure 2.9) illustre la relaxation des contraintes résiduelles transversales sous un chargement quasi-statique appliqué à des éprouvettes soudées en acier S355J2G3. On y observe que lorsque la contrainte appliquée augmente, les contraintes résiduelles décroissent progressivement, en particulier dans la zone de la soudure, conformément au critère de Von Mises. Cela met en évidence que le seuil de plastification locale est rapidement atteint lorsque la contrainte de soudage et la charge externe sont superposées. La figure 2.10 compare les contraintes résiduelles maximales disponibles au niveau du pied de soudure dans des éprouvettes de petite et de grande échelle, pour différents aciers. Les résultats montrent que dans les grandes structures, les contraintes résiduelles au pied de soudure peuvent atteindre jusqu'à 80 % de la limite d'élasticité, alors qu'elles sont limitées à environ 60 % dans les petites éprouvettes. Cette augmentation est due au plus grand degré de blocage (restraint) structurel dans les pièces massives, ce qui accentue le potentiel dangereux de ces contraintes vis-à-vis de l'amorçage de fissures de fatigue.

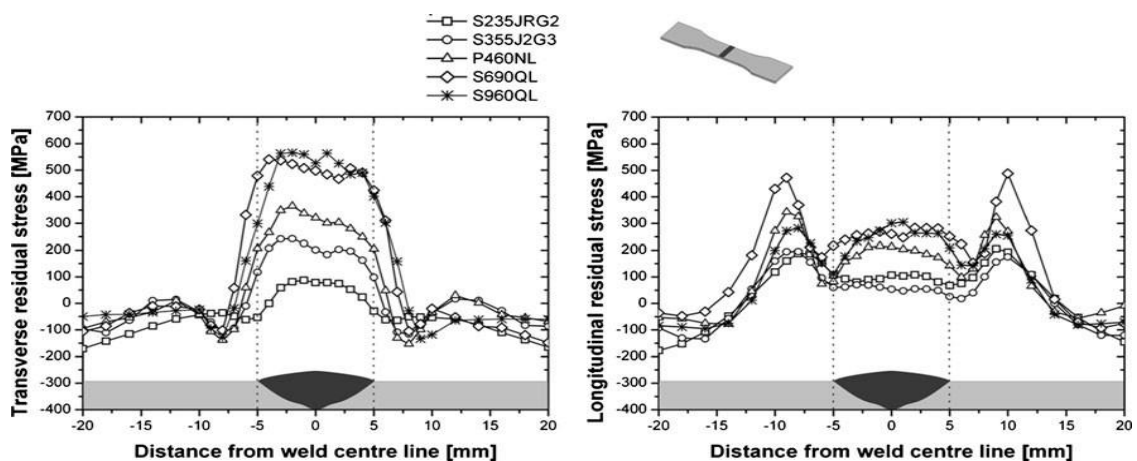


Figure2. 7:Distribution des contraintes résiduelles pour les différents types d'aciers Soudés par TIG dans le sens (a) transversale (b) longitudinale [37]

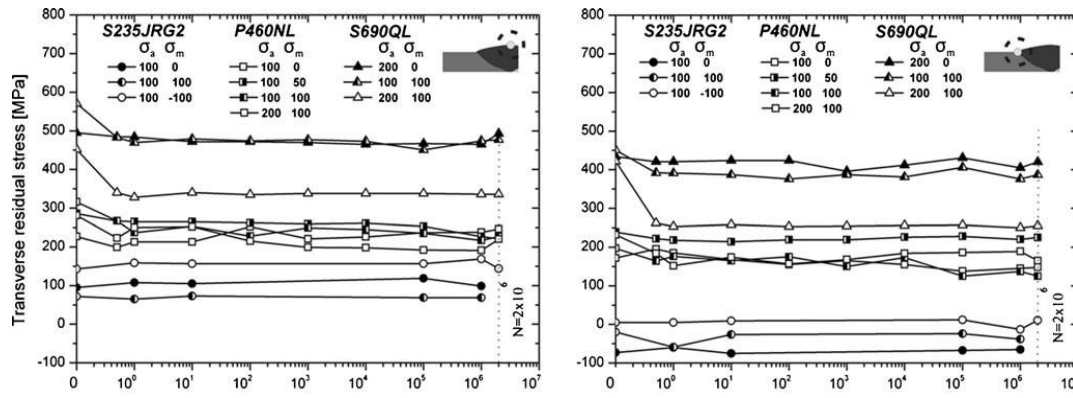


Figure2. 8: Relaxation des contraintes résiduelles transversales au niveau de l'axe de la soudure (à gauche) et au pied de la soudure(à droite) en fatigue cyclique élevée[37]

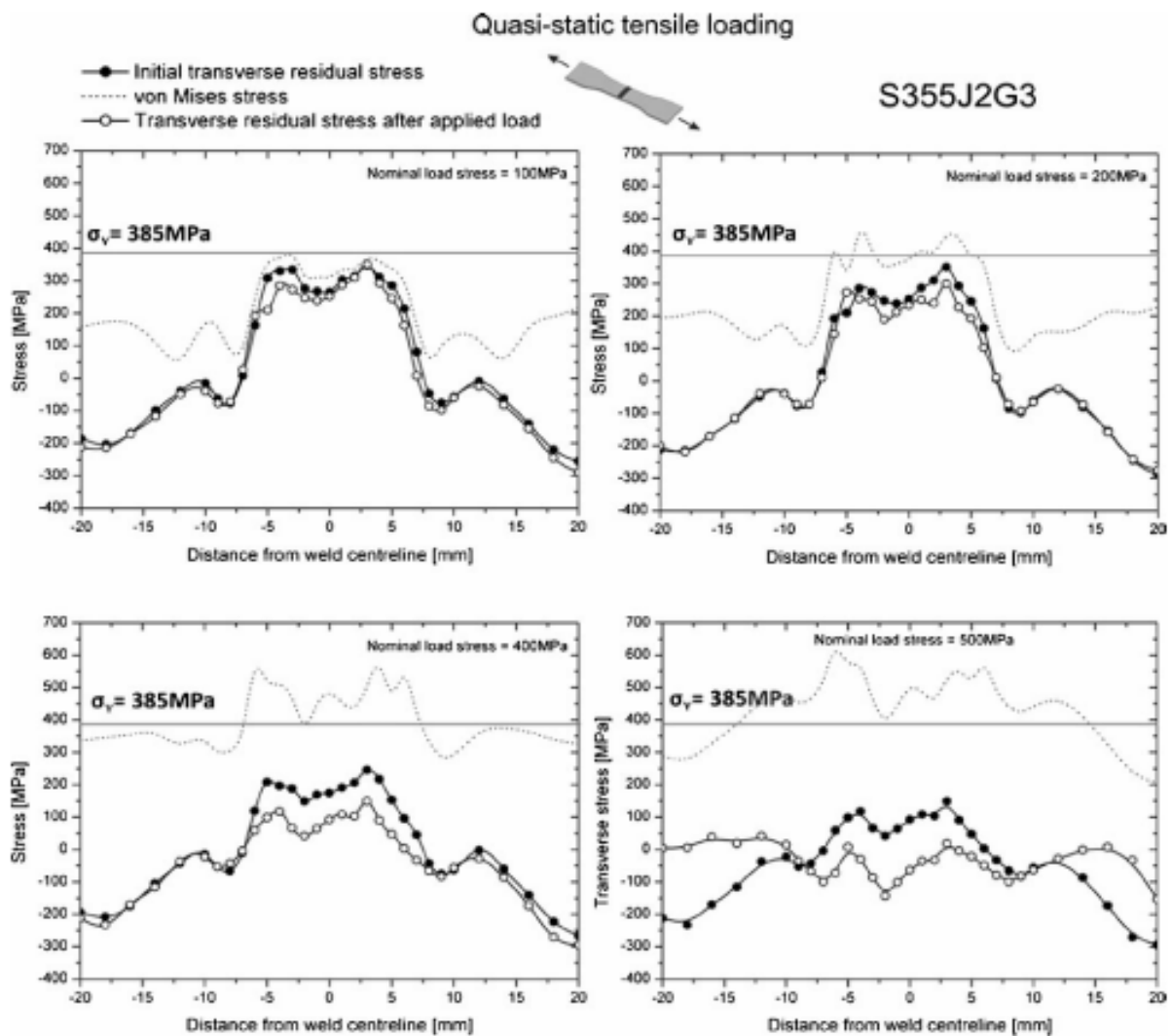


Figure2. 9: Relaxation des contraintes résiduelles transversales sous charge de traction quasi-statique dans des échantillons soudés S355J2G3[37]

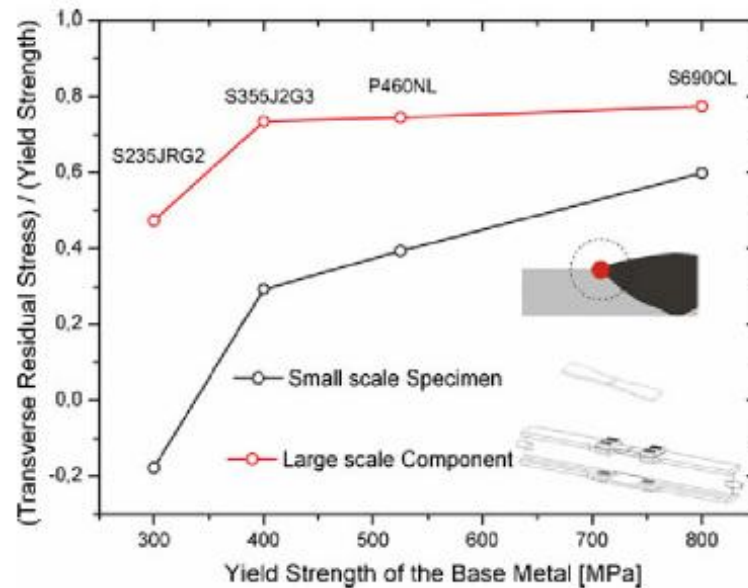


Figure2. 10: Comparaison de la contrainte résiduelle transversale maximale disponible au niveau du pied de soudure dans différents aciers [37]

En présence de contraintes résiduelles, les essais de fatigue ne sont généralement pas réalisés aux rapports de charge nominaux prévus, mais plutôt à des rapports de charge effectifs, qui restent inconnus. Toutefois, **Hansel et al. [38]** ont montré que la résistance à la fatigue dépend des contraintes moyennes effectives lorsque les contraintes résiduelles et le rapport de charge sont pris en compte simultanément. Récemment, **Wang et Qian[39]** ont mené des recherches expérimentales et numériques pour évaluer les contraintes résiduelles de soudure de surface et d'épaisseur et leur relaxation dans les plaques soudées en acier 316L sous l'action de la contrainte de fatigue. Les contraintes résiduelles et leur relaxation n'affectent pas l'amplitude de contrainte pour la charge cyclique appliquée mais affectent le rapport de charge. Le rapport de charge augmente avec la présence de 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 appliqué initialement. Dans le cas d'un soudage multi-passes, **Wang et Qian [39]** ont également observé l'apparition de contraintes résiduelles de traction aux abords de la zone de fusion, tandis qu'elles deviennent compressives à mesure que l'on s'éloigne de cette zone (figure 2.11). Par ailleurs, l'augmentation du nombre de passes de soudage entraîne une élévation de la température générée ainsi qu'une intensification des contraintes résiduelles.

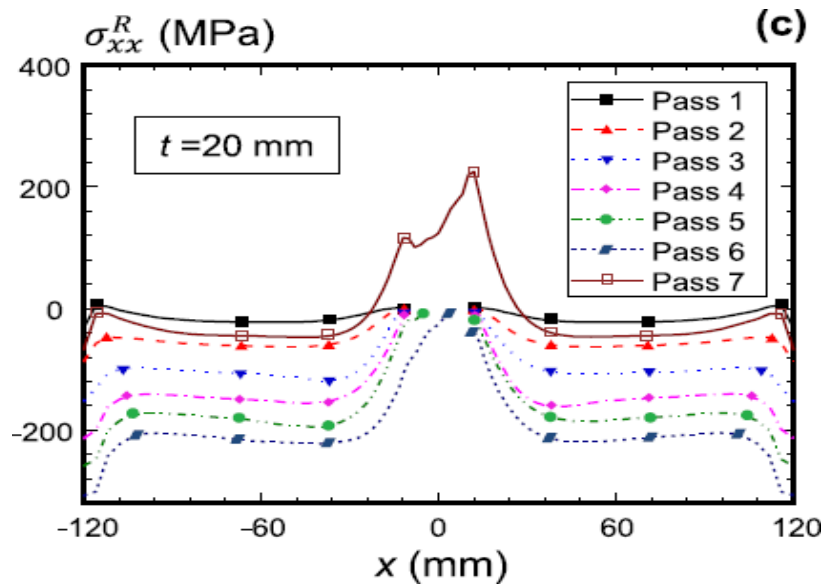


Figure2. 11: Contraintes résiduelles générées après sept passes de soudage [39]

5.3 Étude des distributions des contraintes résiduelles longitudinales et transversales dues au soudage dans une plaque :

Kaplan et Maury [40] soulignent que le profil des contraintes induites par le soudage varie en fonction de l'orientation considérée. En général, les contraintes longitudinales sont plus importantes que les contraintes transversales, avec un pic situé au centre de la zone soudée. La figure 2.12. Illustre un exemple typique de cette distribution.

Le long de l'axe y, correspondant à la direction de la soudure, la contrainte longitudinale reste en traction sur toute la longueur, bien qu'elle diminue progressivement aux extrémités de la plaque. En revanche, la contrainte transversale est également en traction sur la majeure partie de la plaque, sauf aux extrémités, où elle devient compressive.

Le long de l'axe x, on observe un comportement inverse : la contrainte transversale demeure positive (traction), tandis que la contrainte longitudinale passe de l'état de compression aux extrémités à un état de traction dans la zone du cordon de soudure.

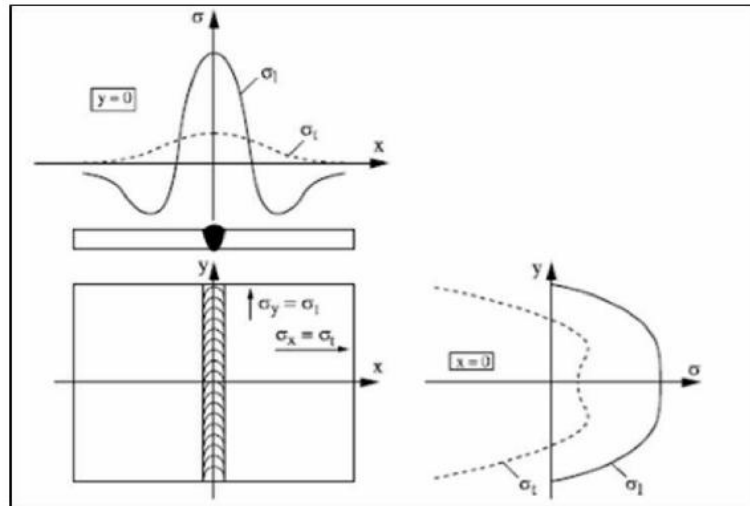


Figure2. 12: contraintes résiduelle longitudinale et transversale dues soudage dans plaque [40]

5.4 Conclusion

Cette revue de littérature a présenté et synthétisé les effets des contraintes résiduelles induites par le processus de soudage sur la durée de vie en fatigue, en mettant l'accent sur le comportement cyclique et la propagation des fissures. Les résultats des recherches analysées montrent que :

- * La vitesse de propagation des fissures est influencée par la variation du rapport de charge ainsi que par l'effet d'échelle des éprouvettes utilisées.
- * Les contraintes résiduelles générées par le soudage, principalement de nature tensionnelle, favorisent l'augmentation de la vitesse de propagation des fissures, en particulier dans le sens longitudinal par rapport au sens transversal.
- * Les contraintes résiduelles sont généralement tensionnelles au niveau de la zone de fusion et de la zone affectée thermiquement, tandis qu'elles deviennent compressives à mesure que l'on s'éloigne de la zone de fusion.
- * Au cours de la propagation des fissures, les contraintes résiduelles se relaxent progressivement à mesure que la fissure s'allonge, entraînant une diminution de leur intensité.
- * La vitesse de propagation des fissures de fatigue est réduite lorsque celles-ci se développent perpendiculairement au joint de soudure.

CHAPITRE III : Méthodologie de Prédiction & Données Expérimentales

1 Introduction

Ce chapitre décrit la méthodologie utilisée pour prédire la propagation des fissures de fatigue en prenant en compte plusieurs paramètres : le chargement, les propriétés du matériau, la géométrie de la structure, et les contraintes résiduelles, le tout dans le cadre du code AFGROW [37]

2 Code AFGROW:

AFGROW est un logiciel de calcul conçu pour prédire la durée de vie en fatigue ainsi que la vitesse de propagation des fissures, en tenant compte des conditions de chargement et des contraintes résiduelles, notamment celles induites par le soudage. Développé en 1987 par Harter pour le compte de la NASA, ce code repose sur des données expérimentales relatives aux matériaux. Il dispose de deux interfaces principales : l'interface dédiée à la modélisation géométrique (figure 3.1) et celle consacrée aux propriétés des matériaux (figure 3.2). À cela s'ajoutent des interfaces intermédiaires ou auxiliaires permettant d'introduire des chargements cycliques, qu'ils soient à amplitude constante ou variable (figure 3.3 figure 3.4).

Le logiciel permet également d'intégrer différents types de matériaux, y compris à partir de résultats expérimentaux externes. Les résultats générés par AFGROW se présentent principalement sous forme de tableaux numériques, illustrant l'évolution de la longueur de la fissure en fonction du nombre de cycles $a=f(n)$, ainsi que la vitesse de propagation $da/dN=f(\Delta K)$.

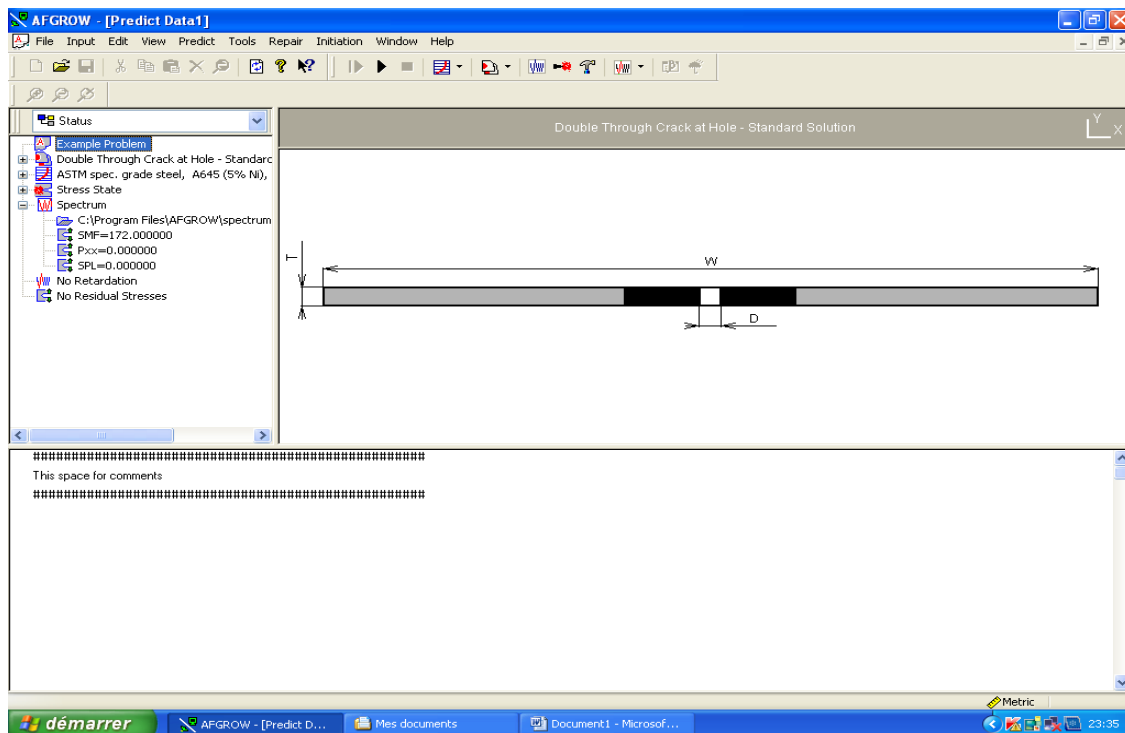


Figure3. 1: Interface géométrie [41]

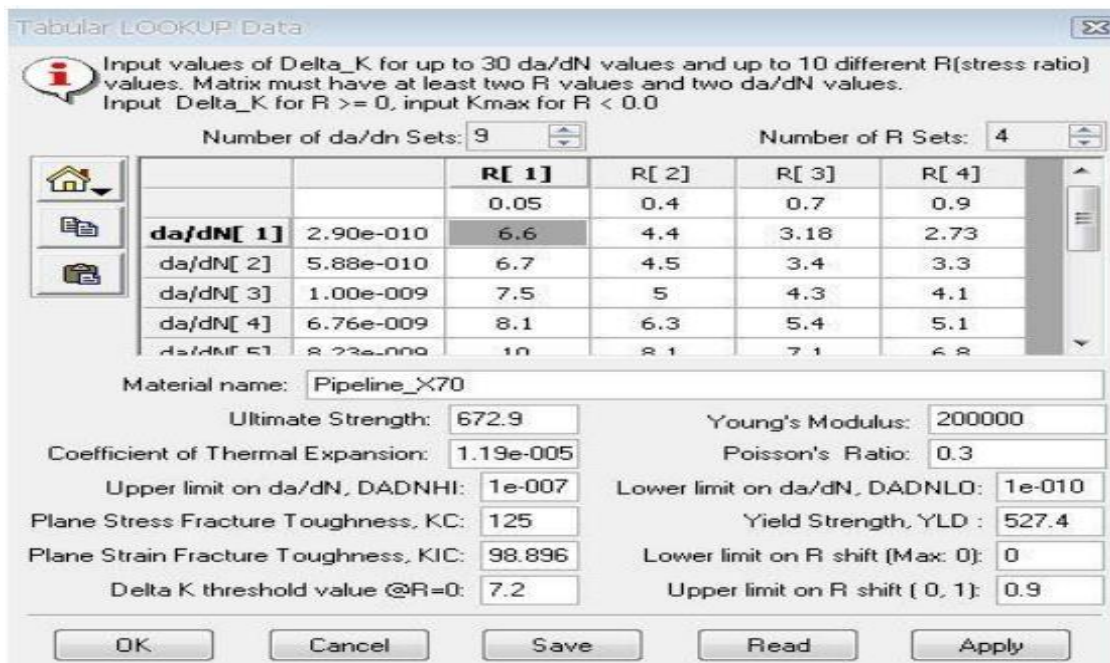


Figure3. 2: Interface matériau [41]

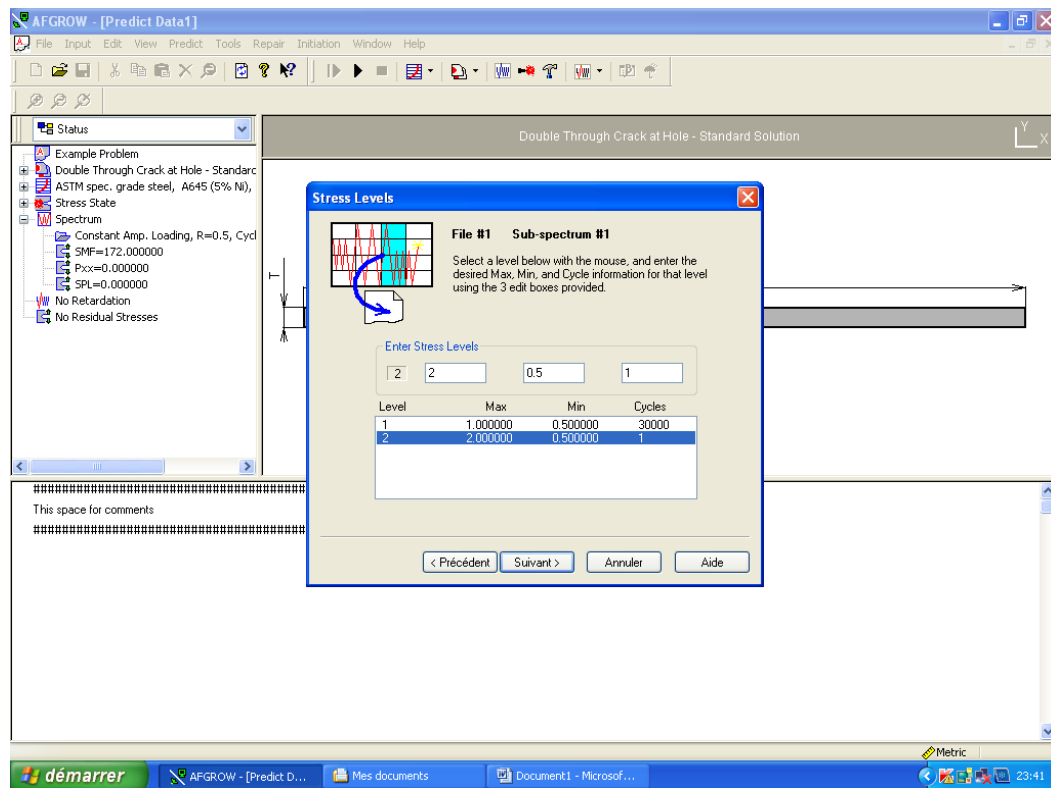


Figure3. 3: interface chargement variable ORL=2.0 et rapport de charge R=0.5 [41]

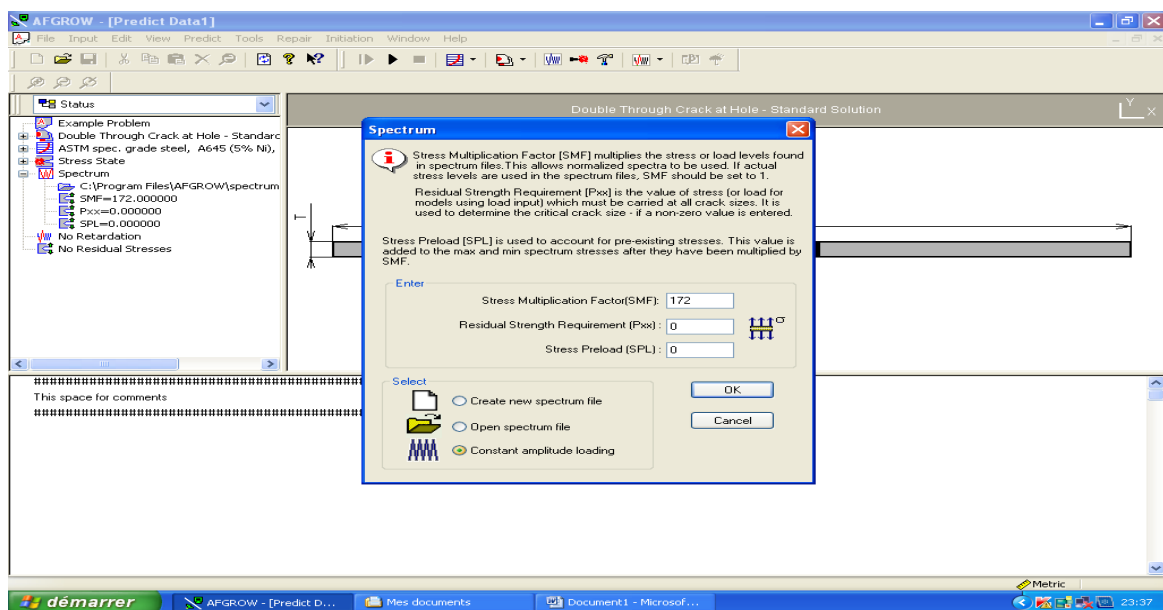


Figure3. 4: interface chargement cyclique [41]

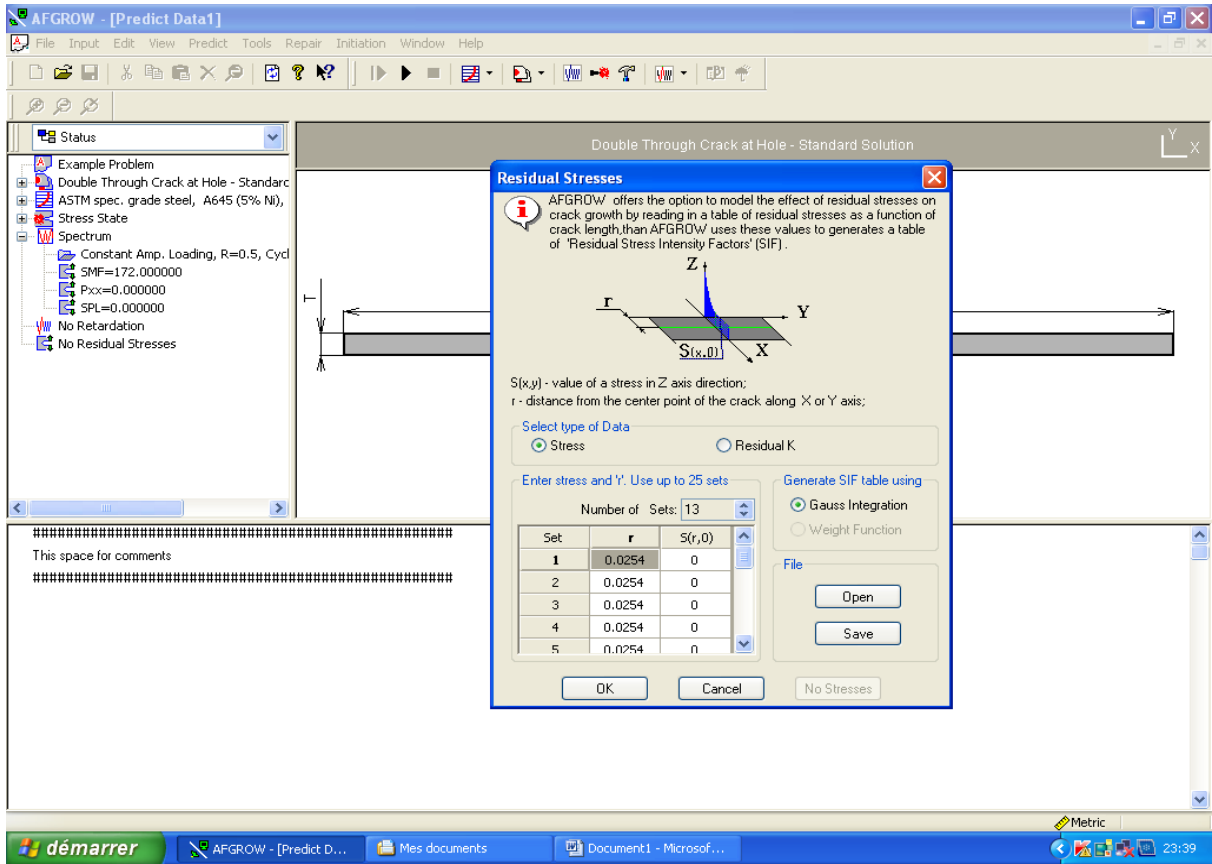


Figure3. 5: Interface contraintes résiduelles [41]

➤ Nous avons utilisé le modèle de Willenborg pour analyser les données de notre étude

2.1 Modèle de willenborg :

Ce modèle, inspiré des travaux de Wheeler [42], repose sur une loi de type [43]

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{eff})^m \quad (3.1)$$

$$K_{(eff)} = K_{max} - K_{min} \quad (3.2)$$

$$K_{max} - K_{min} = K_{max} - K_r \quad \text{et} \quad K_{min} - K_r = K_{min} - K_r \quad (3.3)$$

Ces modèles prennent en compte les effets d'interaction liés aux zones plastifiées induites par les surcharges, mais leur utilisation reste limitée aux cas de surcharge, c'est-à-dire aux phénomènes de retard de propagation de fissure. En revanche, ils ne considèrent pas les effets liés aux sous-charges, qui peuvent provoquer une accélération de la fissuration.[42]

Pour intégrer ces deux effets retard et accélération **Gallagher et Hugges** [44] ont introduit un paramètre correctif, noté ϕ_r , dans le modèle généralisé de Willenborg, permettant de tenir compte de la complexité des séquences de chargement.[42]

Ce modèle généralisé repose sur le principe du facteur d'intensité de contrainte effectif, et sa formulation, telle qu'elle est implémentée dans le code AFGROW, est la suivante :

$$\begin{aligned} K_{\max (eff)} &= K_{\max} - K_r \\ K_{\min (eff)} &= K_{\min (ol)} - K_r \\ R_{eff} &= K_{\min (eff)} / K_{\max (eff)} \end{aligned} \quad (3.4)$$

K_r représente le facteur d'intensité des contraintes résiduelles générées par l'application de la surcharge, tandis que R_{eff} désigne le rapport de charge effectif tenant compte de ces contraintes résiduelles dans le calcul de la propagation de fissure.

$$K_r = \phi \left(K_{\max (ol)} \sqrt{1 - \frac{(a - a(ol))}{r_p(ol)}} - K_{\max} \right) \quad (3.5)$$

Le facteur ϕ est défini par l'équation suivante :

$$\Phi = \left(\frac{1 - \Delta K_{th}}{K_{\max}} \right) / (SOLR - 1) \quad (3.6)$$

La zone plastique développée par la surcharge, notée $r_{y(ol)}$ (voir figure 3.6), est calculée à l'aide de l'expression suivante :

$$r_p(ol) = \left(\frac{K_{\max (ol)}}{\sigma_{0.2}} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{\alpha \pi} \right) \quad (3.7)$$

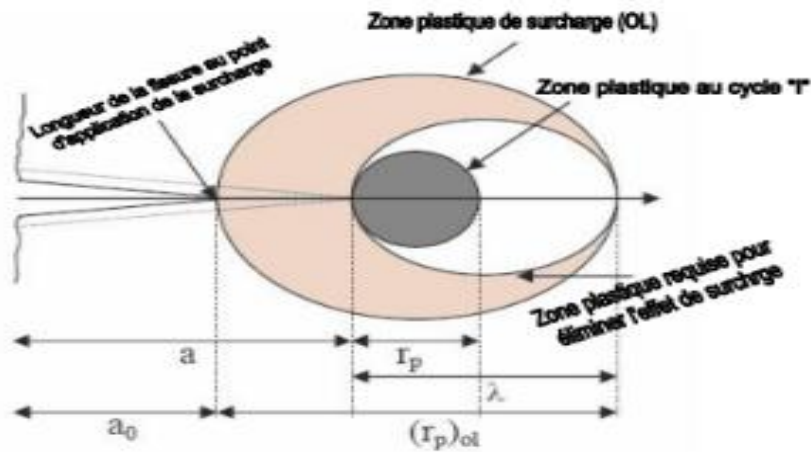


Figure 3. 6: Représentation schématique du modèle généralisé de Willenborg" [44]

a : Longueur de la fissure

a(OL) : Longueur de la fissure au moment de la surcharge

ΔK_{th} : Seuil du facteur d'intensité de contrainte effectif pour un rapport de charge $R=0$

SOLR : Rapport d'arrêt de surcharge, défini comme le rapport entre la surcharge et la charge nominale nécessaire pour arrêter temporairement la propagation de la fissure (voir Tableau 3.1)

α : État de contrainte dans la direction de propagation de la fissure (valeurs typiques: 2.0 pour contrainte plane, 6.0 pour déformation plane)

Le modèle généralisé de Willenborg utilise le rapport d'arrêt de surcharge (SOLR) en tant que propriété intrinsèque du matériau (cf. Tableau 3.1). Ce paramètre permet d'intégrer l'effet de l'historique de chargement dans la prédiction de la durée de vie en fatigue.[42]

Tableau 3. 1: Paramètres influençant l'effet d'arrêt de surcharge [42]

Matériau	Paramètre SOLR
Acier	2.0
Aluminium	3.0
Titanium	2.7

3 Description du modèle de prédiction NASGRO:

3.1 Effet de retard dû à l'application d'une surcharge :

Lorsqu'une surcharge est appliquée à une fissure préalablement initiée sous un chargement de faible amplitude constant, un retard dans la propagation de la fissure peut être observé. Dans certains cas, ce retard peut aller jusqu'à un arrêt complet de la propagation. L'effet de cette surcharge se traduit par une zone d'influence autour de l'extrémité de la fissure, caractérisée par une longueur a_d , ainsi qu'un nombre de cycles associé N_d pendant lesquels la propagation reste ralentie ou suspendue.

L'application d'une surcharge est définie par le taux de surcharge : $\tau = \text{ORL} = \Delta K_{\text{pic}} / \Delta K$

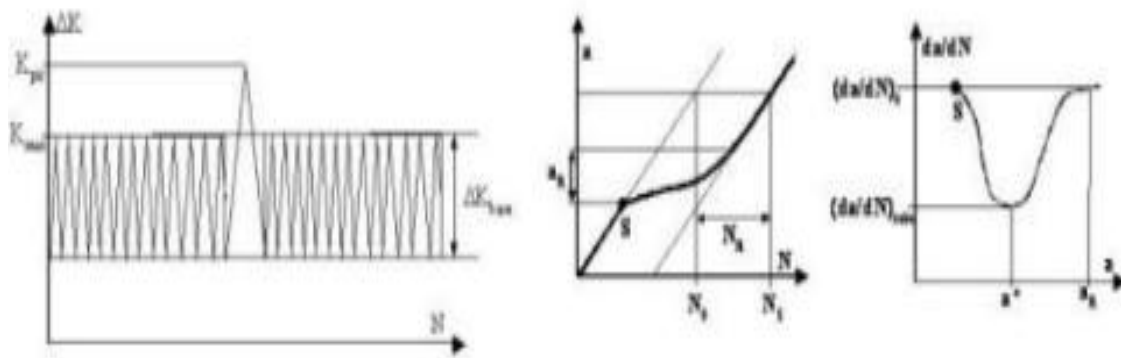


Figure 3. 7: définition d'une surcharge [45]

4 Géométrie et matériau d'étude:

4.1 Modèle géométrique :

Le modèle géométrique utilisé pour l'analyse du comportement en fatigue, présenté à la figure 3.9, correspond à une plaque d'épaisseur 4 mm, intégrée dans le logiciel AFGROW. Ce modèle comporte un trou central de 3 mm de diamètre, usiné au niveau de la ligne de fusion dans le cas d'une pièce soudée. Deux fissures initiales de (5mm, 10mm) chacune sont positionnées de part et d'autre du trou.

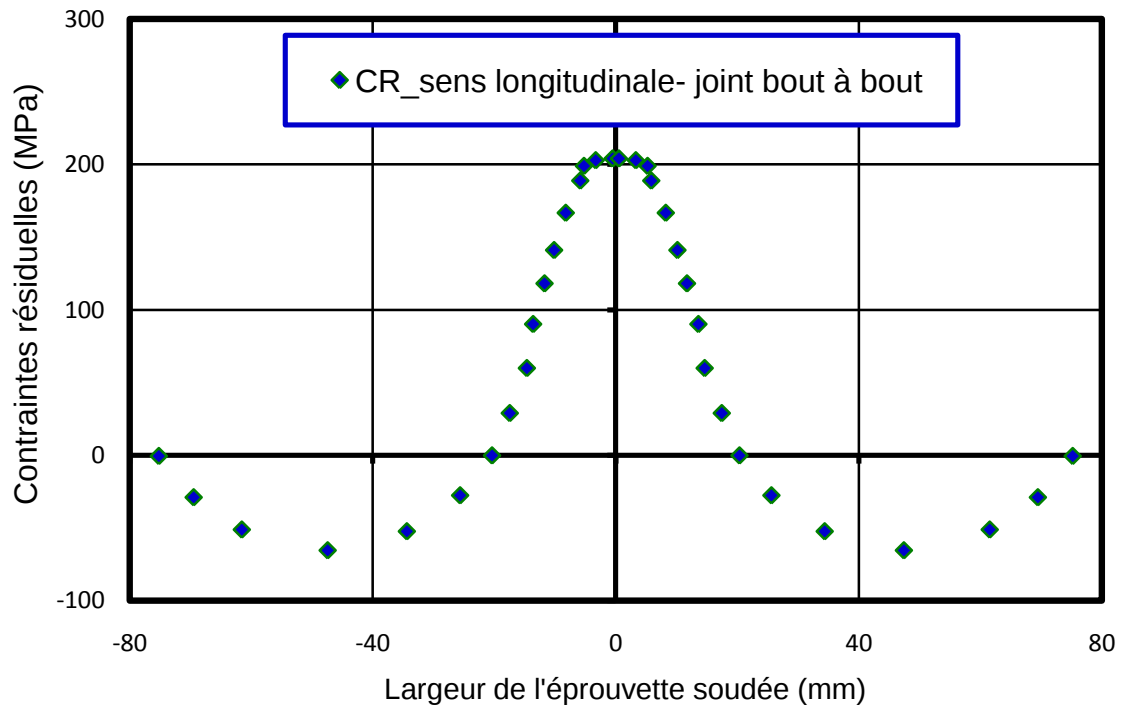


Figure3. 8: Evolution du Contraintes résiduelles en fonction de Largeur de l'éprouvette soudée (mm) pour R=0.5

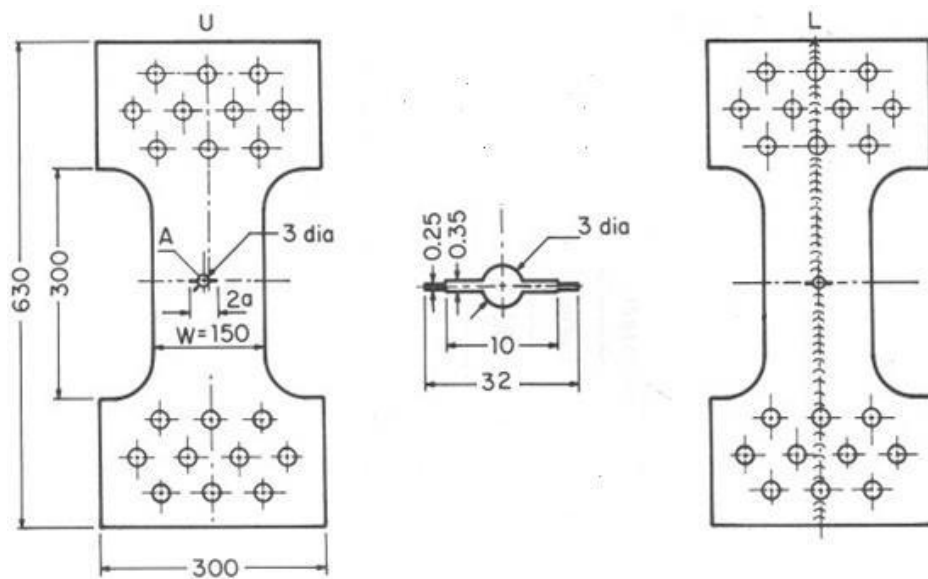


Figure3. 9: modèles géométriques des éprouvettes soudées et non soudées

4.2. Matériau d'étude :

Le matériau retenu pour cette étude est l'acier ASTM A645 Grade 45, équivalent à l'acier 18G2AV selon la norme polonaise. Sa composition chimique et ses propriétés mécaniques sont présentées respectivement dans les tableaux 3.2 et 3.3. Les paramètres du modèle de propagation utilisés dans le logiciel NASGRO sont quant à eux résumés dans le tableau 3.4.

Tableau 3. 2: 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. 3: 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. 4: Paramètres du modèle de propagation Nasgro

C	m	p	q	$\Delta K_{th \rightarrow 0}$
3.41×10^{-11}	2.5	0.25	0.25	5.49

CHAPITRE IV: Résultats & Discussion

1 Effets des contraintes résiduelles dues au soudage sous chargements constants et variable

1.1 Effets des contraintes résiduelles dues au soudage pour $a_0 = 5 \text{ mm}$

Les effets des contraintes résiduelles sur les durées d'un joint soudé en bout à bout de vie sous chargement constant défini par $R=0.5$ et $\sigma_{\max}=172 \text{ MPa}$ (figure 4.1) et chargement variable avec un taux de surcharge $ORL=2.0$ et $R=0.5$ (figure 4.2) sont montrés par la figure 4.3. En absence des contraintes résiduelles, on note que pour un chargement constant, la longueur de fissure atteinte est de l'ordre de 43 mm pour une durée de vie de 580 000 cycles. Alors qu'en présence des contraintes résiduelles dues au soudage, la durée de vie en fatigue a diminué à 500 000 cycles pour une longueur de fissure de 46 mm. En absence des contraintes résiduelles et en application d'une surcharge avec $ORL=2.0$, la durée de vie atteinte est devenue plus importante et est de l'ordre de 1 100 000 cycles à une longueur de 20 mm. Cette augmentation est due aux contraintes résiduelles générées par l'application de la surcharge. En présence des contraintes résiduelles de tension avec un taux de surcharge $ORL=2.0$, on note une diminution significative (2.5 fois) de la durée de vie pour presque la même longueur (380 000 cycles). Figure 4.4 montre l'effet des contraintes résiduelles et chargements cycliques sur la vitesse de fissuration d'un joint soudé pour $a_0=5\text{mm}$.

La figure 4.4 montre les effets des chargements appliqués (constant et variable) en absence et en présence des contraintes résiduelles dues au soudage sur la vitesse de propagation da/dN . On note que pour un rapport de charge $R=0.5$ une augmentation de la vitesse da/dN pour un chargement avec surcharge comparativement par rapport aux autres chargements cités sur la figure 4.4. En présence des contraintes résiduelles, les courbes da/dN se propagent de la même façon sans donner lieu à des effets significatifs pour $R=0.5$.

L'application de la surcharge donne lieu à une diminution du rapport de charge effectif (R_{eff}) stabilisé à 0.3 en absence des contraintes résiduelles par rapport à un chargement constant pour $R=0.5$ (figure 4.5). En présence des contraintes résiduelles, le rapport de charge effectif (figure 4.5) est affecté par le facteur d'intensité de contraintes « K_r » dû à la variation des contraintes résiduelles (figure 4.6) où il dépend de la distribution des contraintes résiduelles. Ce facteur K_r est calculé numériquement par la méthode d'intégration de Gauss.

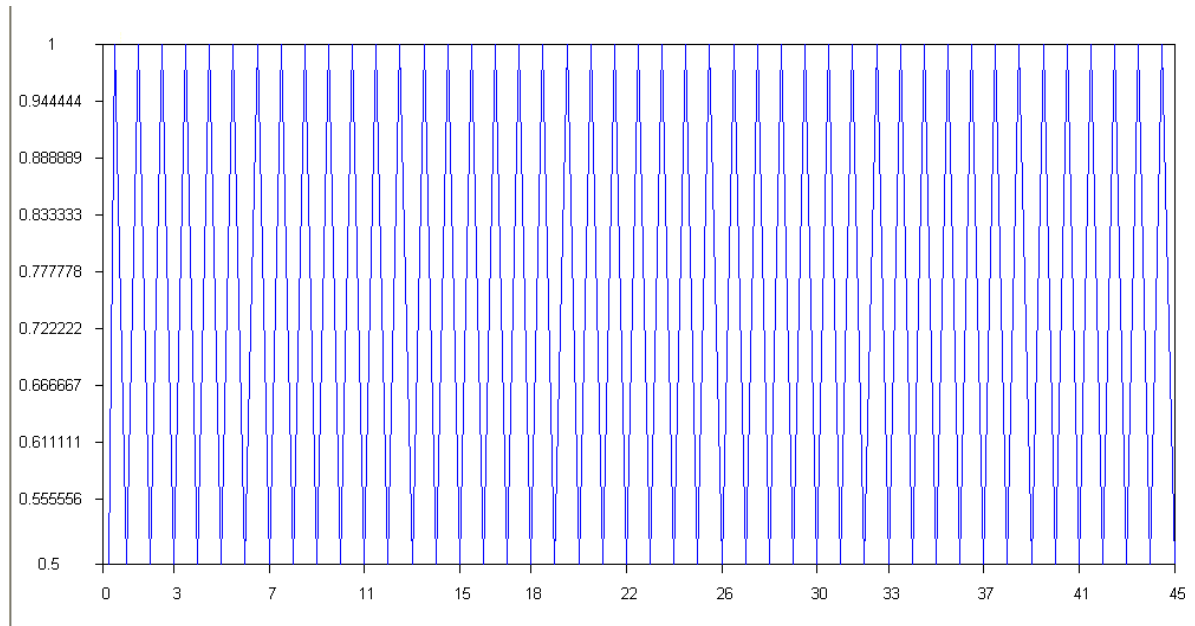


Figure4. 1: Chargement constant pour $R=0.5$

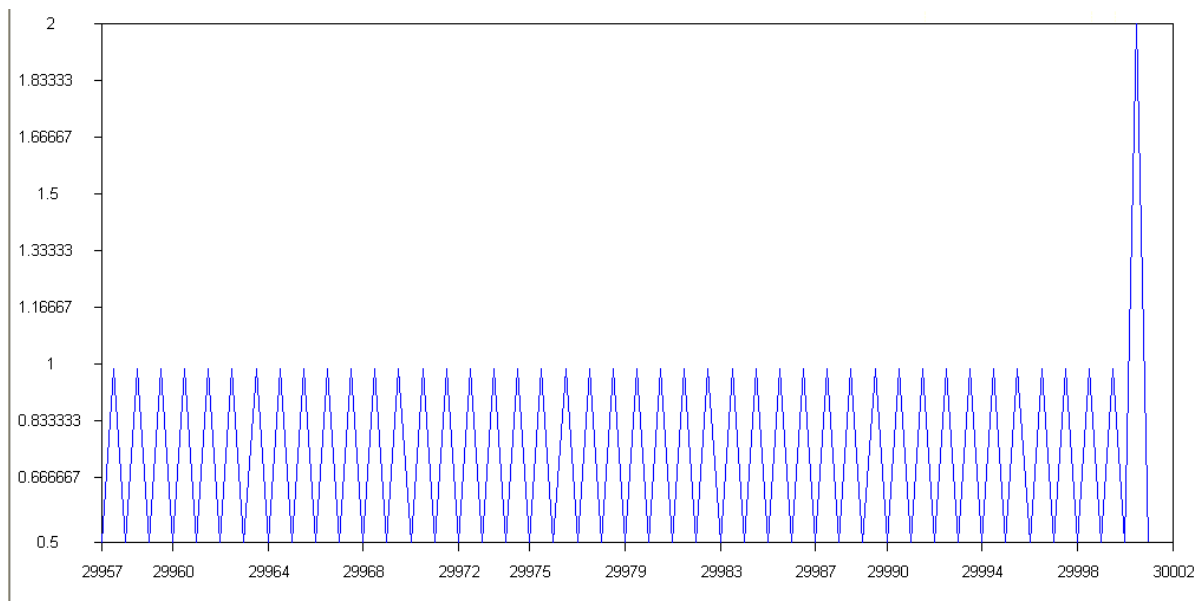


Figure4. 2: Chargement variable pour $ORL=2.0$ et $R=0.5$

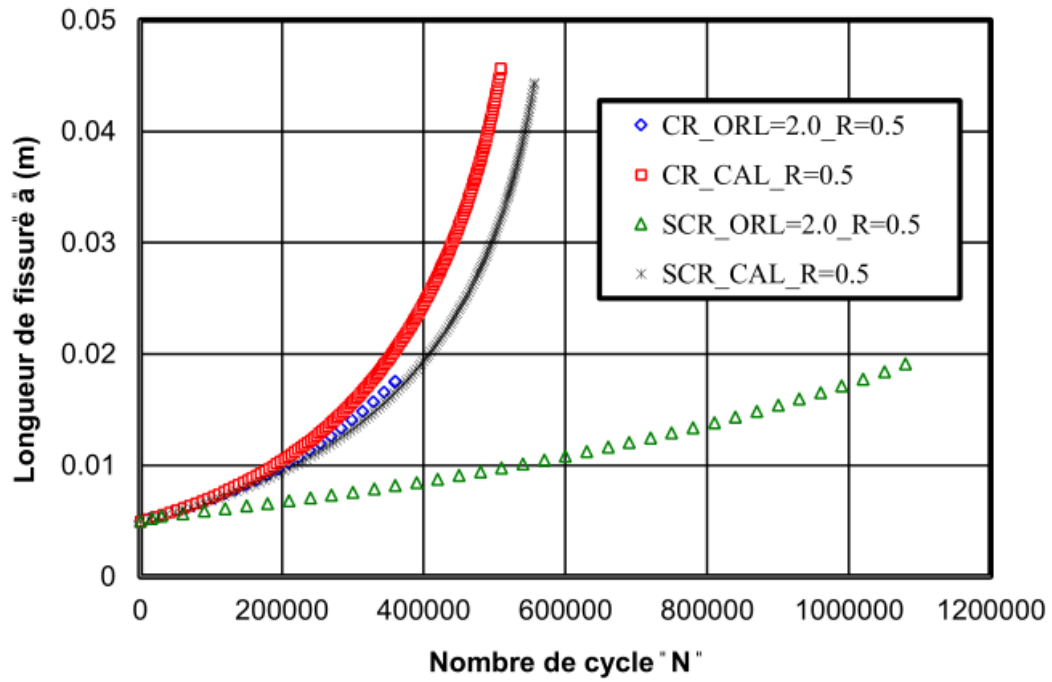


Figure4. 3: Effets des contraintes résiduelles et chargements cycliques sur évolution de la longueur de la fissure pour $a_0=5$ mm

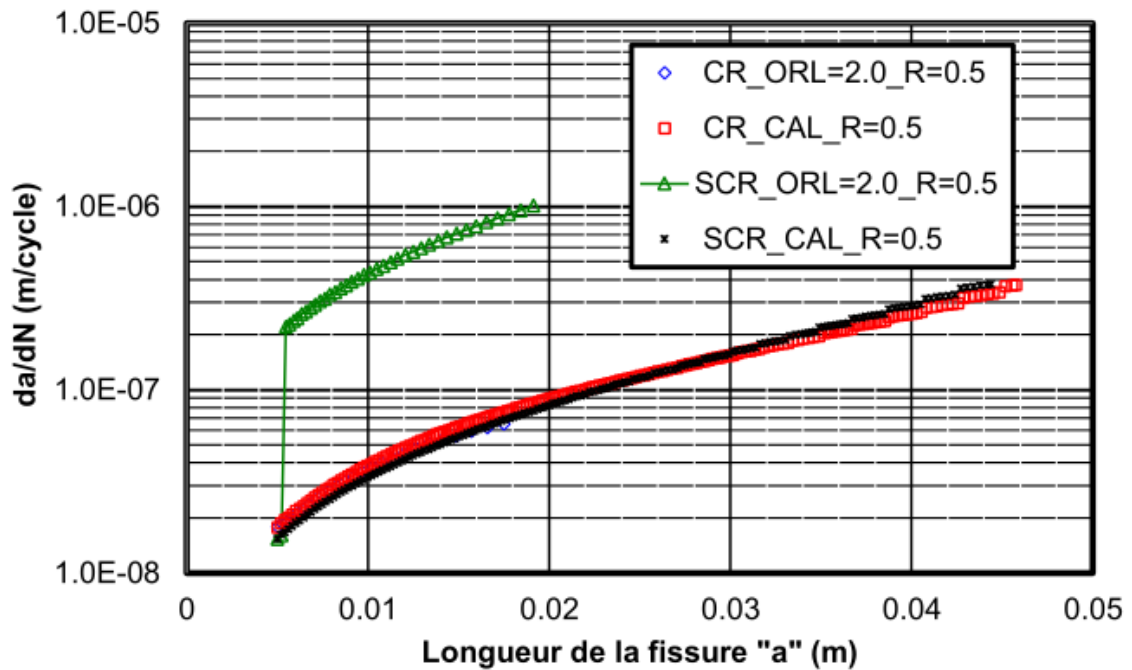


Figure4. 4: Effet des contraintes résiduelles et chargements cycliques sur la vitesse de fissuration d'un joint soudé pour $a_0=5$ mm

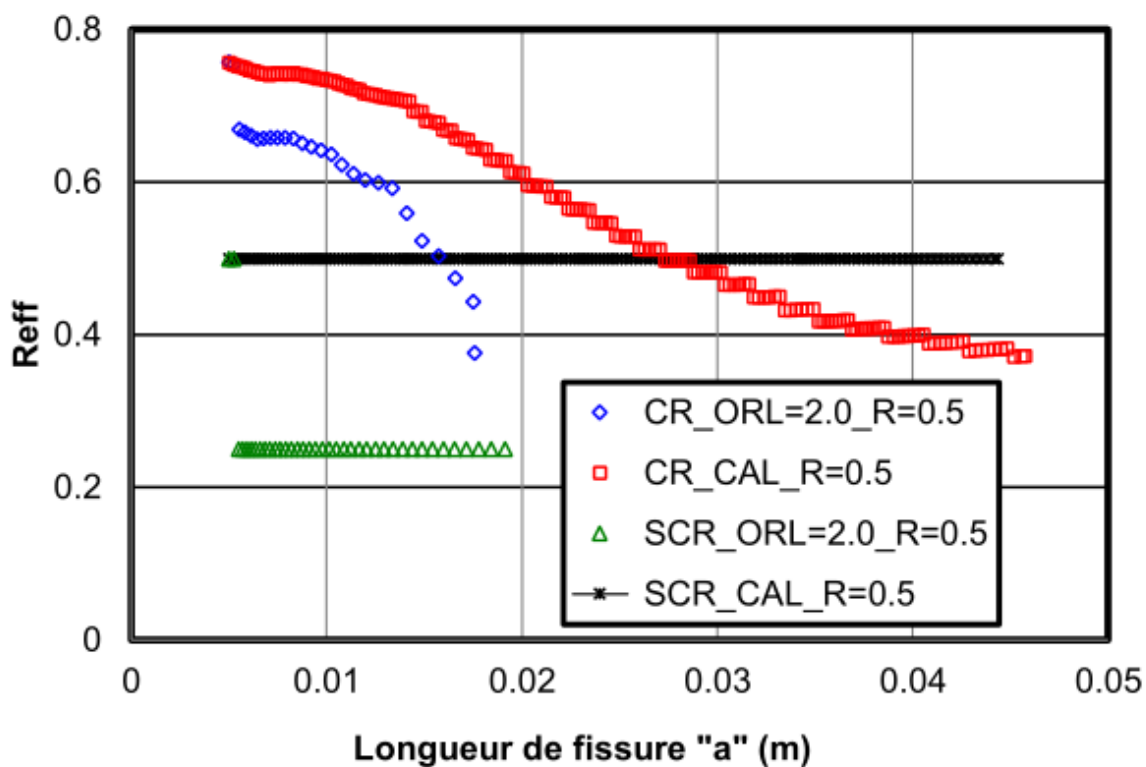


Figure4. 5: Evolution du rapport "Reff" en fonction de "a" et en présence des contraintes résiduelles pour $a_0=5$ mm

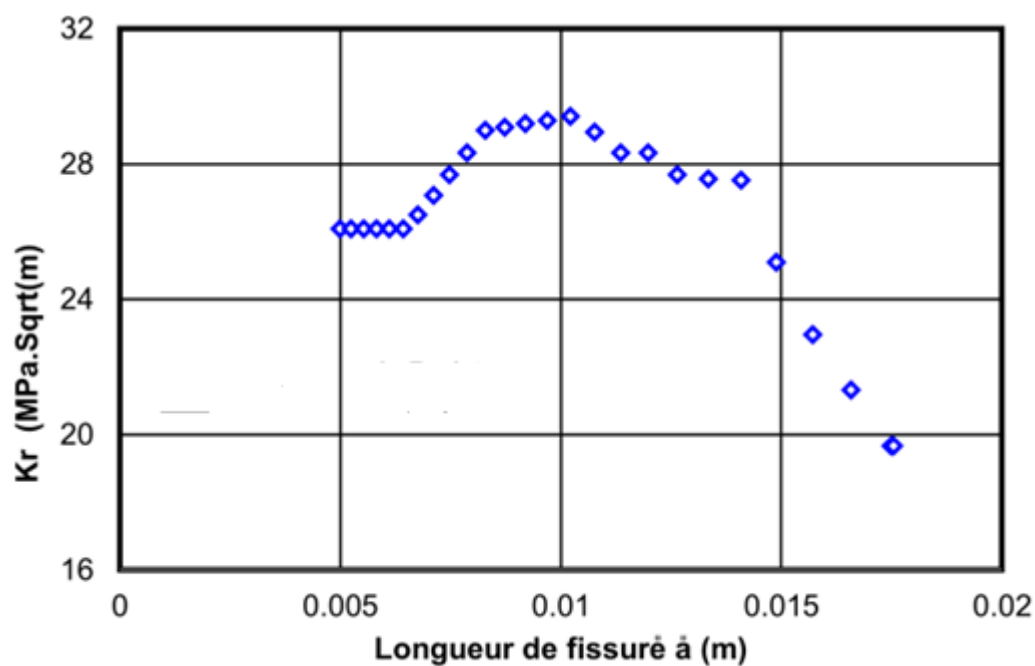


Figure4. 6: Evolution du facteur Kr en fonction de la longueur "a"

1.2 Effets des contraintes résiduelles dues au soudage pour $a_0=10$ mm :

Les effets des contraintes résiduelles sur les durées d'un joint soudé en bout à bout de vie sous chargement constant défini par $R=0.5$ et $\sigma_{\max}=172$ et chargement variable avec un taux de surcharge $ORL=2.0$ et $R=0.5$ sont montrés par la figure 4.7, (même condition de figure 4.3). En absence des contraintes résiduelles, on note que pour un chargement constant, la longueur de fissure atteinte est de l'ordre de 44 mm pour une durée de vie de 3385 00 cycles. Alors qu'en présence des contraintes résiduelles dues au soudage, la durée de vie en fatigue a diminué à 310500 cycles pour une longueur de fissure de 45mm. En absence des contraintes résiduelles et en application d'une surcharge avec $ORL=2.0$, la durée de vie atteinte est devenue plus importante et est de l'ordre de 480015 cycles à une longueur de 18mm. Cette augmentation est due aux contraintes résiduelles générées par l'application de la surcharge. En présence des contraintes résiduelles de tension avec un taux de surcharge $ORL=2.0$, on note une diminution significative (4 fois) de la durée de vie pour presque la même longueur (120003 cycles). Figure 4.8 montre les effets des contraintes résiduelles et chargements cycliques sur la vitesse de fissuration d'un joint soudé pour $a_0=10$ mm.

La figure 4.8 montre les effets des chargements appliqués (constant et variable) en absence et en présence des contraintes résiduelles dues au soudage sur la vitesse de propagation da/dN . On note que pour un rapport de charge $R=0.5$ une augmentation de la vitesse da/dN pour un chargement constant en absence et présence de contraintes résiduelles pour une vitesse $3.75E-07$ et chargement variable $ORL=2.0$ avec présence de contrainte résiduelles cela augmente $3.97E-08$ elle est diminuée à une valeur de $4.21E-8$ ça augmente et de diminuer en raison de chargement variable et présence de contrainte résiduelles.

La figure 4.9 montre les effets des chargements appliqués (constant et variable) en absence et présence des contraintes résiduelles dues au soudage sur la vitesse de propagation da/dN en fonction du facteur ΔK . On note que pour un rapport de charge $R=0.5$ une augmentation de la vitesse da/dN pour un chargement avec surcharge comparativement par rapport aux autres chargements cités sur la figure 4.9 en présence des contraintes résiduelles. Les courbes da/dN se propagent de la même façon sans donner lieu à des effets significatifs $R=0.5$.

L'application de la surcharge donne lieu à une diminution du rapport de charge effectif en chargement constant avec contraintes résiduelles mais chargement variable avec contraintes résiduelles cela continue d'augmenter et de diminuer R_{eff} la valeur maximale de R_{eff} est de 0.8 et diminue à 0.5 augmente à 0.7 et continue d'augmenter et de diminuer à une valeur de 0.45

la raison est de ce chargement présence de contraintes résiduelles dans le chargement variable on absence de contrainte résiduelle dans chargements variable est reste stable a une valeur 0.25 est absence de contrainte résiduelle dans chargements constant est reste stable a une valeur 0.5 (figure4.10)

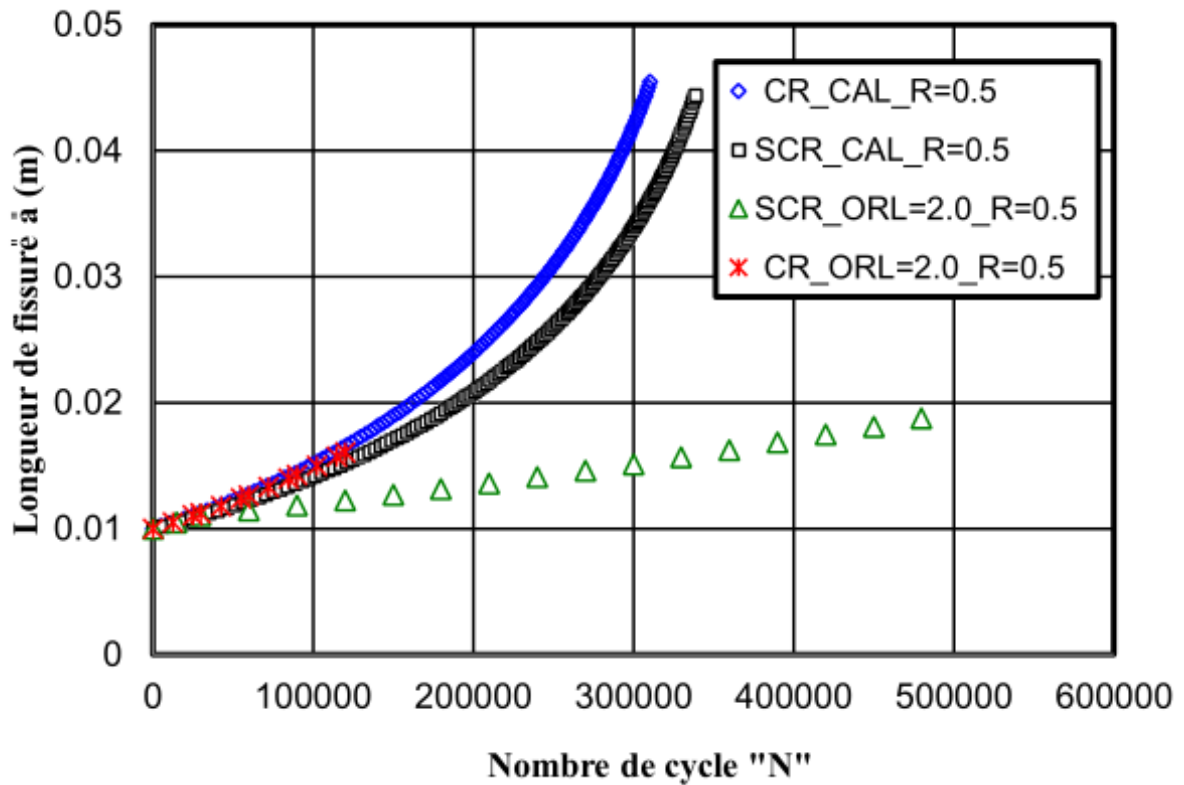


Figure4. 7: Effets des contraintes résiduelles et chargements cycliques sur évolution de la longueur de la fissure pour $a_0=10$ mm

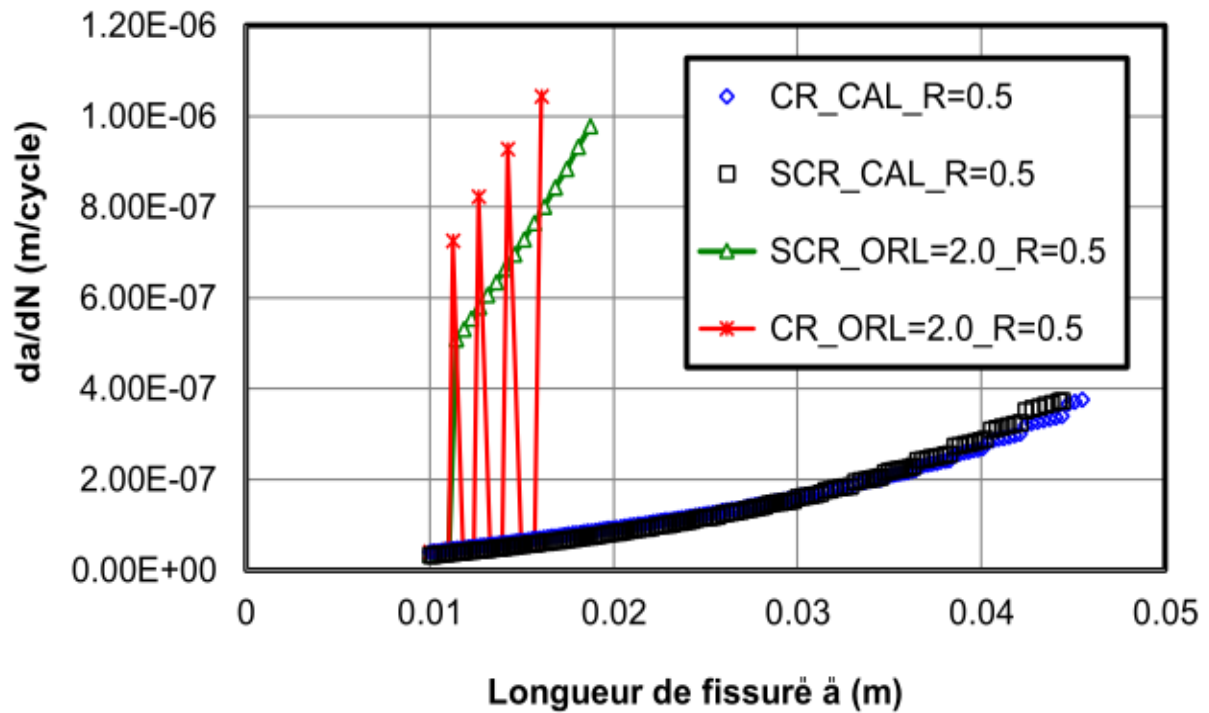


Figure4. 8: Effet des contraintes résiduelles et chargements cycliques sur la vitesse de fissuration d'un joint soudé pour $a_0=10$ mm

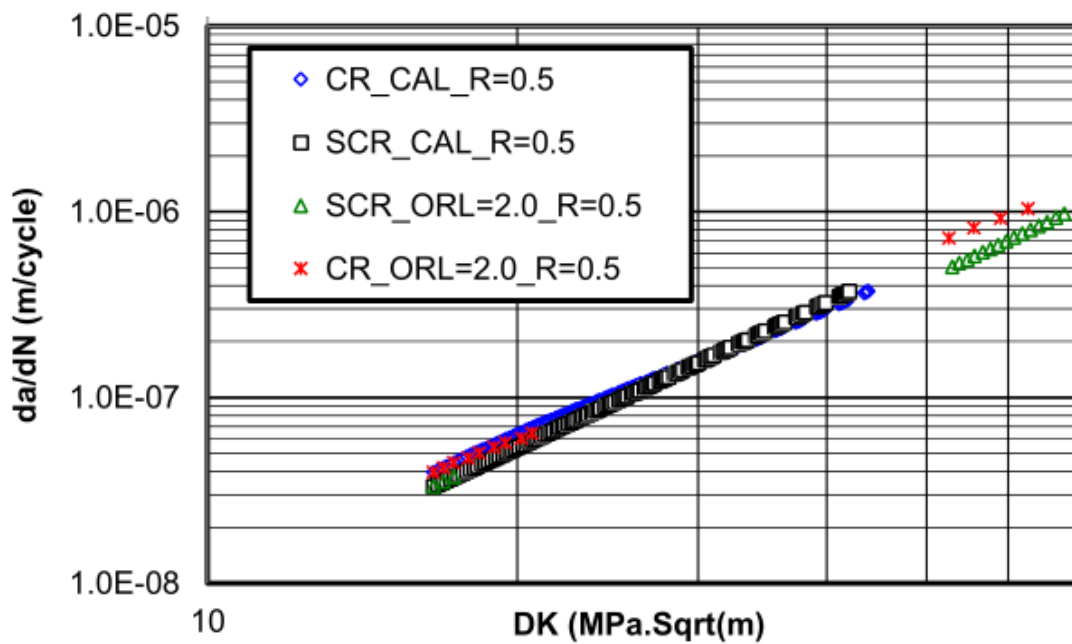


Figure4. 9: Effet des contraintes résiduelles et chargements cycliques sur la vitesse de fissuration d'un joint soudé pour $a_0=10$ mm

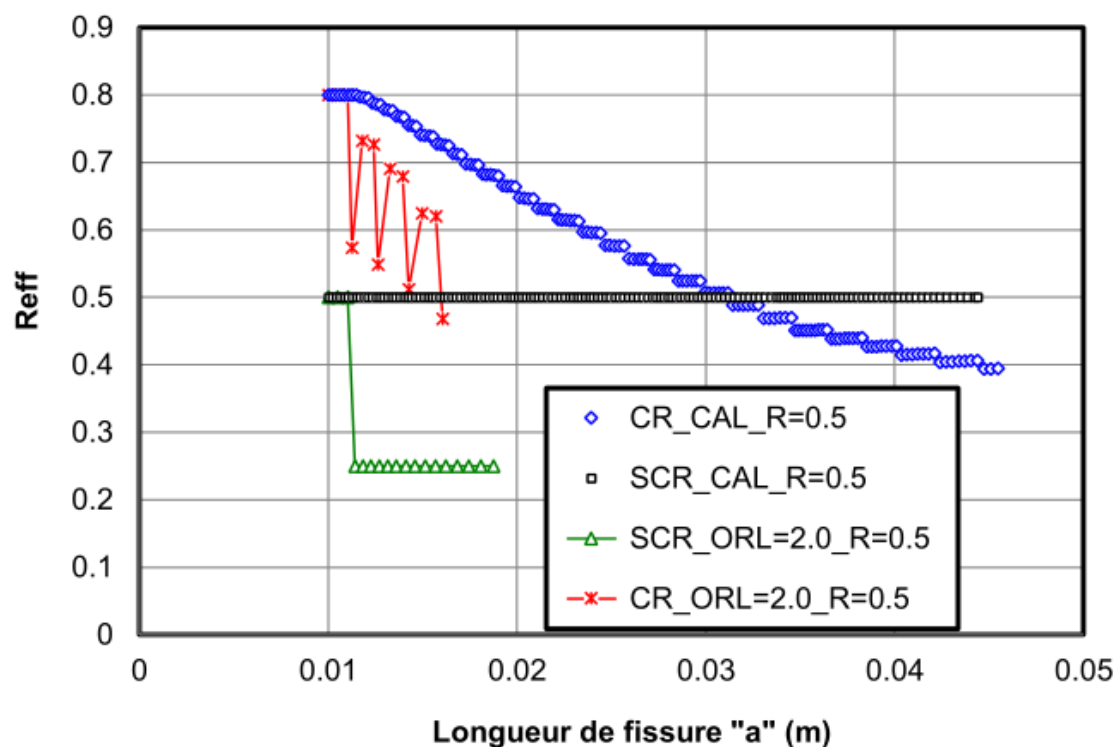


Figure4. 10: Evolution du rapport "R eff" en fonction de "a" et en présence des contraintes résiduelles pour $a_0=10\text{mm}$

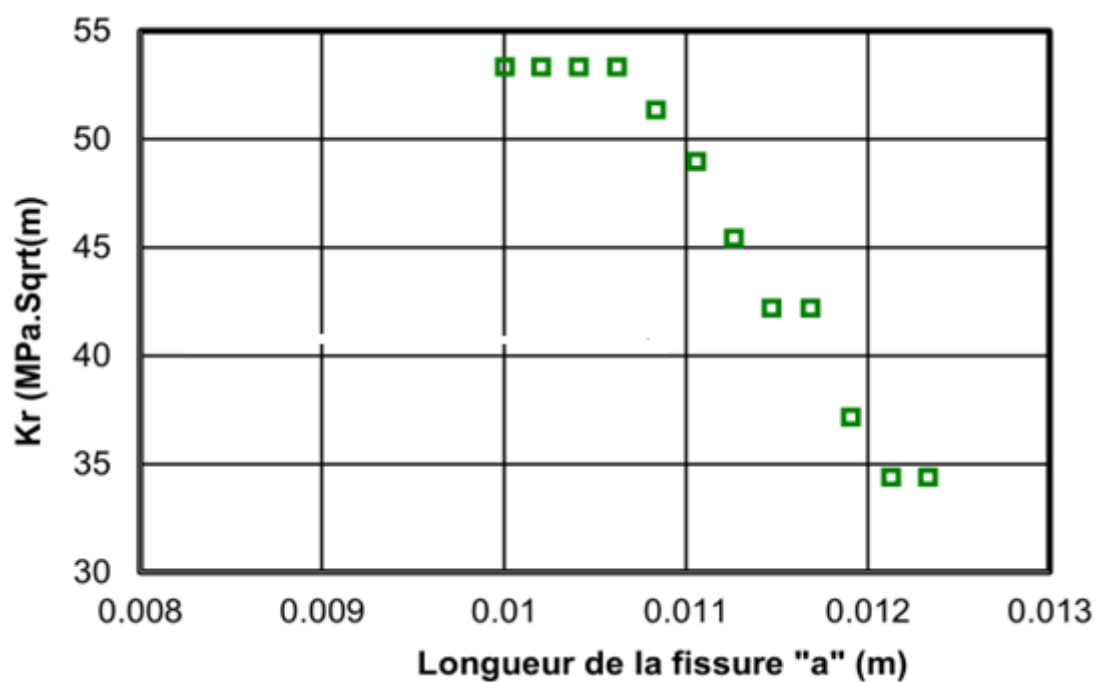


Figure4. 11: Evolution du facteur K_r en fonction de la longueur "a"

2 Influence de la longueur initiale de fissure:

2.1 Chargement constant en absence des contraintes résiduelles

La figure 4.12 présente l'évolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycles pour deux longueurs de fissures initiales : $a_0 = 5$ mm et $a_0 = 10$ mm en absence de contraintes résiduelles. On remarque pour $a_0 = 10$ mm une diminution de la durée de vie par rapport à $a_0 = 5$ mm, le taux de diminution est de 1.6 fois. La fissure se propage plus rapidement, atteignant une longueur maximale de 44 mm atteignant un nombre de cycles de 338500. En revanche, pour $a_0 = 5$ mm, la propagation est plus lente, mais la fissure continue d'évoluer vers un plus grand nombre de cycles, atteignant la même longueur (44 mm) après 556 000 cycles. La figure 4.13 représente l'évolution de la vitesse de propagation en fonction de la longueur de fissure pour des fissures initiales de 5 et 10 mm. Entre une fissure initiale de 5 mm à une longueur de fissure de 20 mm, on note la présence d'une courbure sur cette zone. Le même effet est remarqué pour une fissure initiale de 10 mm. La vitesse initiale pour $a_0 = 5$ mm est de 1.6×10^{-8} m/cycle, alors que pour $a_0 = 10$ mm, la vitesse est de 3.2×10^{-8} m/cycle.

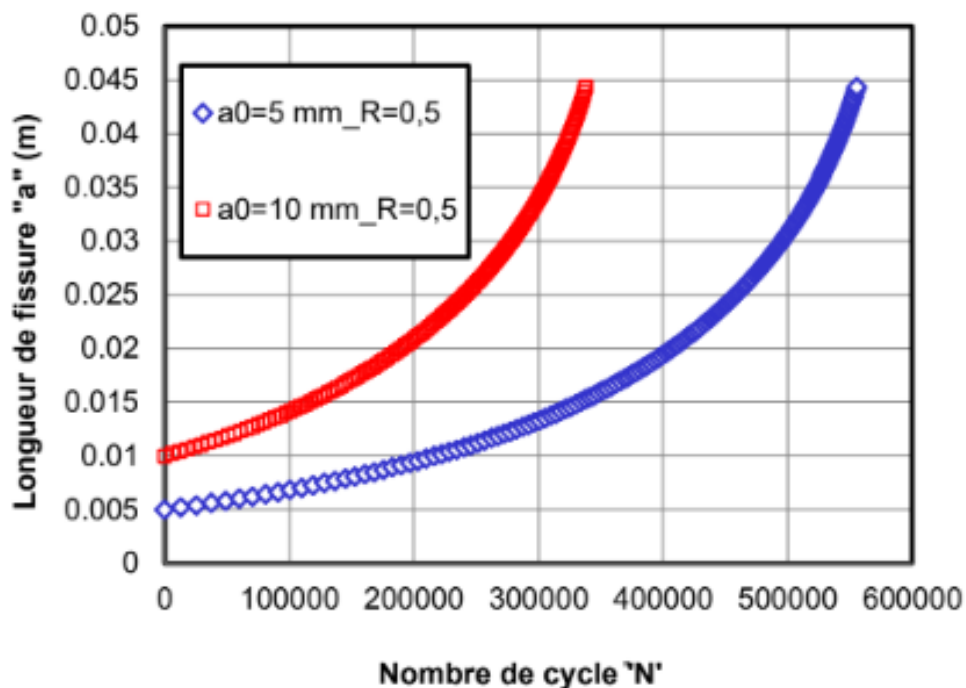


Figure4. 12.Evolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycles 'N'

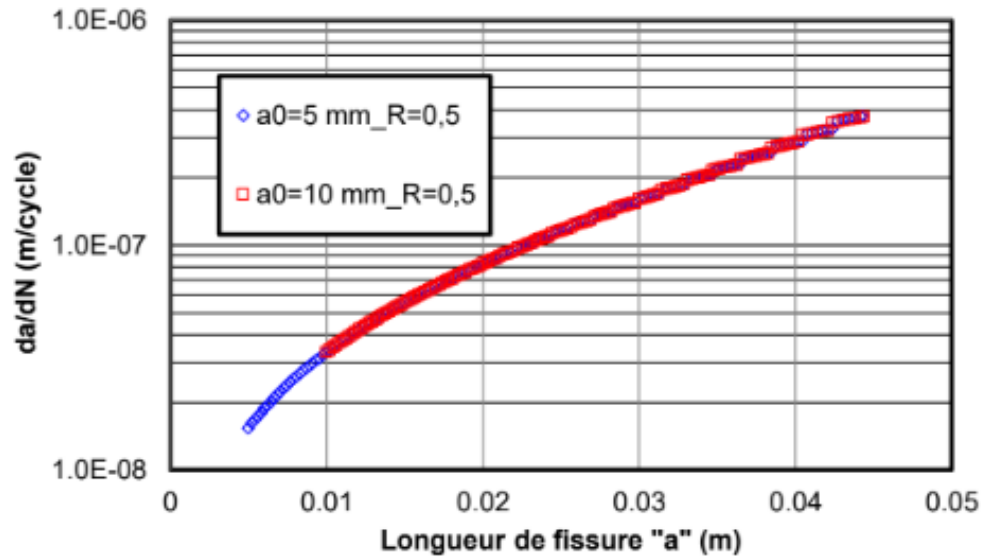


Figure4. 13: Evolution de la vitesse de fissuration en fonction longueur de fissure "a"

2.2 Chargement constant en présence des contraintes résiduelles :

En présence des contraintes résiduelles dues au soudage, l'effet de la fissure initiale est montré par la figure 4.14. Le décalage en durée de vie est de 1.66 fois en passant de 310000 à 510000 cycles. Pour les vitesses de propagation, à $a_0=5$ mm, la vitesse est de 1.8×10^{-8} m/cycle alors que pour $a_0=10$ mm, la vitesse est de 4.0×10^{-8} m/cycle. La vitesse maximale de rupture est de l'ordre de 4×10^{-7} m/cycle. Cette évolution des vitesses de propagation est lié à l'évolution du facteur K_r (figures 4.6 et 4.11) et son influence sur le rapport de charge effectif (figure 4.16) qui modifie la vitesse de propagation. Le rapport de charge diminue avec la diminution du facteur K_r c.à.d la diminution des contraintes résiduelles dues au soudage allant d'un état de tension à un état de compression après 20 mm de propagation.

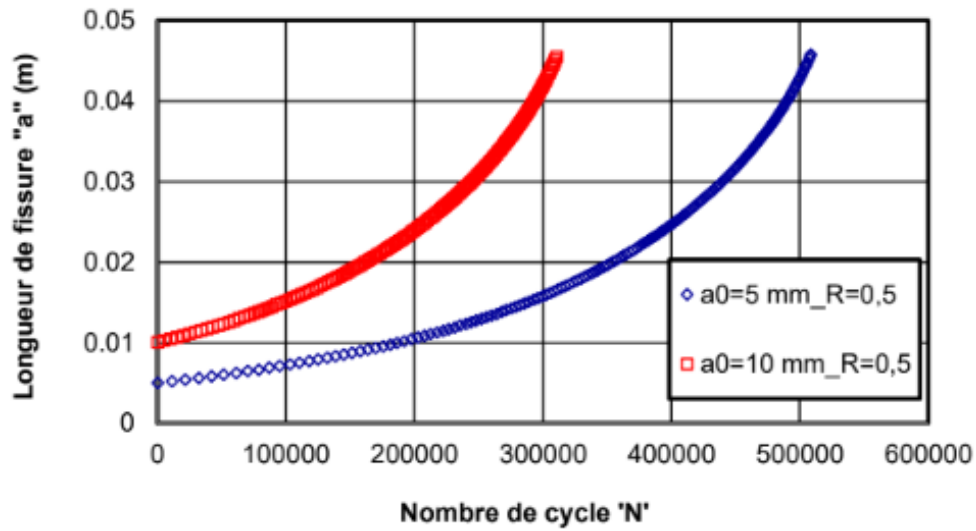


Figure4. 14. Evolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycles

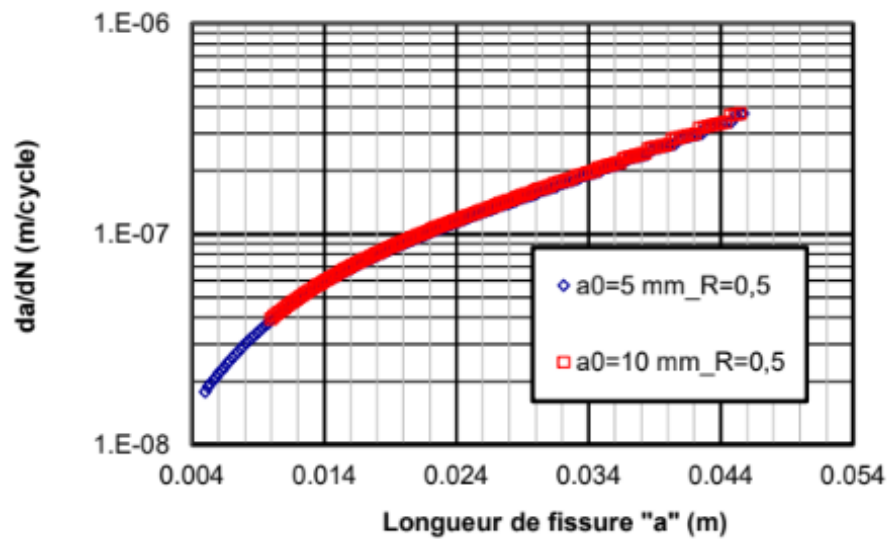


Figure4.15: Evolution de la vitesse de fissuration a fonction longueur de fissure "a"

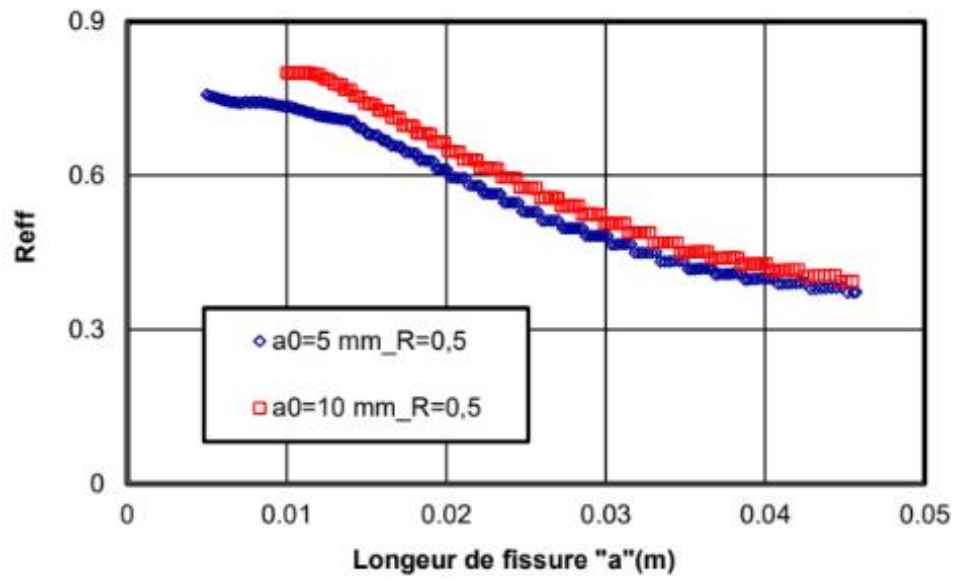


Figure4.16: Evolution de $Reff$ en fonction de la longueur de fissure "a"

2.3 Chargement variable en présence des contraintes résiduelles

Le chargement variable appliqué est donné par la figure 4.2, formé d'un bloc de chargement constant de 30 000 cycles et un cycle de surcharge avec un taux de surcharge $ORL=2.0$. La figure 4.17 représente la variation de la longueur de la fissure sous un chargement avec surcharge et en présence des contraintes résiduelles dues au soudage. La durée de vie en fatigue est importante pour $a_0=5$ mm comparativement à $a_0=10$ mm. Aucun effet de retard n'est constaté après application de la surcharge pour les deux évolutions. La différence en durée de vie est de 180 000 cycles avec un taux de décalage de 2 fois.

La figure 4.18 met en évidence l'effet du chargement avec surcharge. Pour $a_0=5$ mm, l'effet de surcharge est éliminé par le niveau des contraintes résiduelles et le rapport de charge $R=0.5$. Enfin de rupture on note la présence d'une accélération. Cette tendance s'explique par la variation du rapport de charge R_{eff} . Pour l'évolution de la vitesse de propagation à $a_0=10$ mm, on note la présence de pics d'accélérations qui sont dus à la variation du rapport de charge R_{eff} (figure 4.19) sans aucun effet de décélération. Le rapport de charge effectif R_{eff} diminue au cours de la propagation.

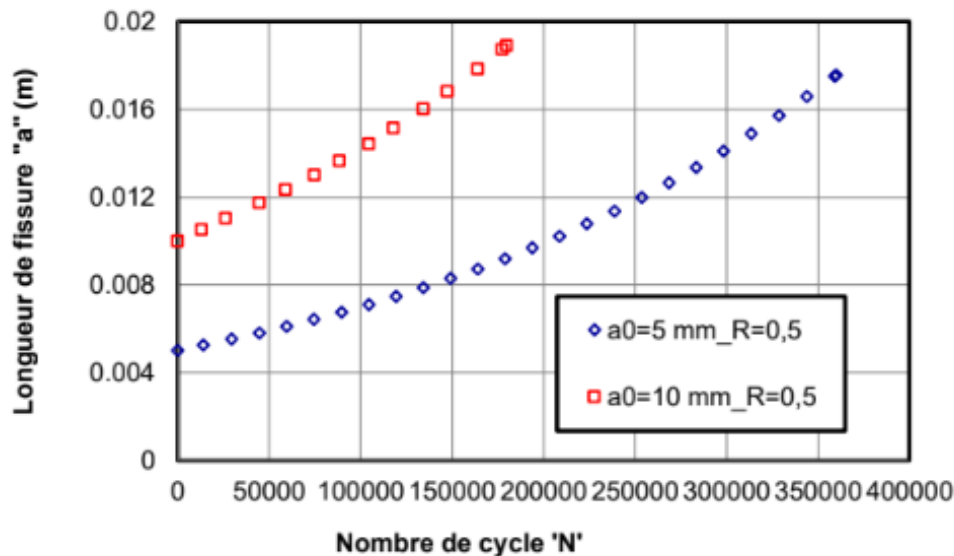


Figure4. 17. Evolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycles

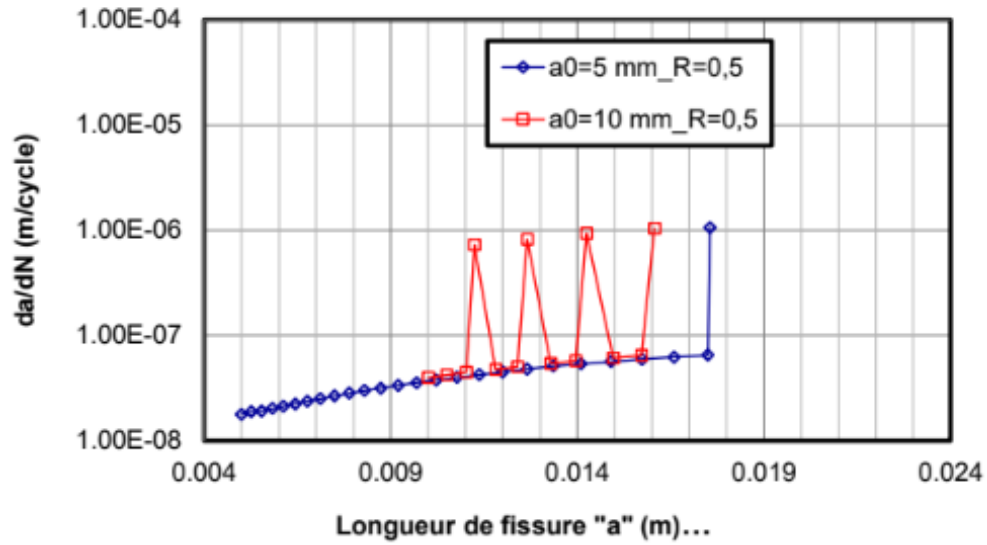


Figure4. 18. Evolution de la vitesse de fissuration a fonction longueur de fissure "a"

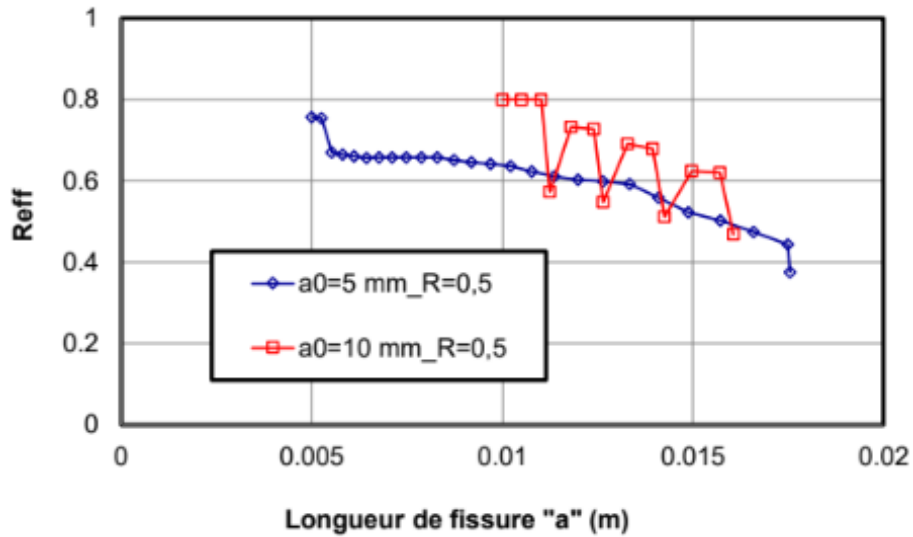


Figure4. 19. Evolution de R_{eff} a fonction longueur de fissure "a"

Conclusion:

Ce chapitre présente une analyse détaillée de l'effet des contraintes résiduelles induites par le soudage sur la propagation des fissures de fatigue dans des assemblages soudés, sous différents types de chargement et longueurs initiales de fissure.

Les résultats obtenus montrent que sous chargement constant ($R = 0.5$), l'influence des contraintes résiduelles est relativement faible. Les courbes de propagation (da/dN) pour les cas avec et sans contraintes résiduelles sont similaires, comme illustré dans les figures 4.4 et 4.8. Cela indique que, dans ce régime de chargement, la présence de contraintes résiduelles n'affecte que très peu la cinétique de fissuration.

En revanche, sous chargement variable avec surcharge ($ORL = 2.0$), les contraintes résiduelles ont un impact significatif. La vitesse de propagation des fissures augmente de manière notable, particulièrement lorsque les contraintes résiduelles sont de nature traction (voir figures 4.13, 4.15 et 4.18). Cette accélération de la fissuration diminue la durée de vie en fatigue des assemblages.

Par ailleurs, l'étude met en évidence l'influence de la longueur initiale de la fissure ($a_0 = 5\text{mm}$ vs 10 mm). Une fissure plus longue engendre une propagation plus rapide et une réduction de la durée de vie, comme montré dans les figures 4.3 et 4.7.

Les paramètres mécaniques dérivés, tels que le rapport de charge effectif R_{eff} et le facteur d'intensité de contrainte normalisé K_r , sont également affectés par la présence de contraintes résiduelles. Leur évolution en fonction de la longueur de fissure est décrite dans les figures 4.5, 4.6, 4.10, 4.11, 4.16 et 4.19.

Enfin, les figures 4.12, 4.14 et 4.17 illustrent l'évolution de la longueur de la fissure en fonction du nombre de cycles (N), mettant en lumière les effets cumulés du type de chargement, des contraintes résiduelles et de la géométrie initiale sur le comportement en fatigue.

Conclusion générale

Ce mémoire a focalisé son attention sur l'analyse conjointe des effets des contraintes résiduelles dues à la soudure sur le comportement en fatigue de fissuration des matériaux métalliques. Le but de cette analyse a été de quantifier l'influence de ces contraintes internes sur la propagation des fissures et la durée de vie en fatigue en fonction du type de chargement, de la longueur initiale de la fissure.

L'étude de modèle par simulation menée avec le code AFGROW a montré qu'étant un facteur déterminant dans la cinétique de croissance de la fissure, la présence de contraintes résiduelles peut contribuer à une propagation plus rapide de la fissuration, diminuant la durée de vie en fatigue des assemblages soudés, soumise à un chargement variable. De plus, l'effet de la longueur initiale de fissure n'est pas à négliger, car une fissure dont la longueur initiale est importante favorise une rupture plus rapide sous les effets conjugués des contraintes internes.

En conclusion, cette étude souligne la nécessité d'intégrer précisément les contraintes résiduelles dans les analyses de fatigue, en vue d'une évaluation fiable de la durabilité des structures soudées. Elle ouvre également des voies d'optimisation des procédés de fabrication et de contrôle, de façon à diminuer les effets nocifs des contraintes.

Les principaux résultats issus de ce travail peuvent être résumés ainsi :

- * En l'absence de contraintes résiduelles, la présence de surcharges ($ORL = 2.0$) permet d'accroître la durée de vie en fatigue.
- * En présence de contraintes de traction, la durée de vie est alors réduite et l'effet favorable de la surcharge est réduit.
- * Les contraintes résiduelles impactent le rapport de charge effectif ($Reff$) et par conséquent la vitesse de propagation des fissures.
- * La longueur initiale de fissure a un impact non négligeable sur la durée de vie.
- * De manière générale, la prise en compte des contraintes résiduelles dans l'analyse permet d'obtenir des prévisions bien plus réalistes du comportement en fatigue des structures soudées.

REFERENCES

- [1] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fatigue_\(mat%C3%A9riau\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fatigue_(mat%C3%A9riau))
- [2] STEPHENS R.I., A. Fatmi, R.R. Stephenson H.O. Fuchs, Metal fatigue in engineering, 2nd edition, John Wiley and sons, New-York, 2001, ISBN 0-471-51059-9, p.472
- [3] 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.
- [4] 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
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Forman, R.G., (1972). Study of fatigue crack initiation from flaws using fracture mechanics theory. Engineering Fracture Mechanics. Vol. 4(2), pp. 333–345.
- [9] 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.
- [10] BOIVIN Y., Approche moderne de conception et d'analyse de durabilité d'un châssis de motoneige, Mémoire de maîtrise, Faculté des sciences appliquées, Département de génie mécanique, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 1999, p.105
- [11] SHARP M.L., G.E. NORDMARK et C.C. MENZEMER, Fatigue design of aluminum components and structures, McGraw-Hill, New-York, 1996, ISBN 0-07-056970-3, p.353
- [12] Design of Aluminium Structures, Eurocode 9, part 2, Draft for development DD ENV 1999-2:2000, British Standards Institution, London, 2000, ISBN 0-580-36783-5, p.91
- [13] Aluminum Design Manual - Specifications & Guidelines for Aluminum Structures, The Aluminum Association, Washington, 1994

- [14]FermérM. et H. Svensson, Industrial experiences of FE-based fatigue life predictions of welded automotive structures, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 24, pp. 489-500, 2001
- [15]Niemi E., W. Frickeet S.J. Maddox, Fatigue analysis of welded components: Designer's guide to the structural hot-spot stress approach, International Institute of Welding, Woodhead Publishing, Cambridge, 2006, IIW-1430-00, ISBN 1-84569-1245, p.50
- [16]YousefiF., M. Wittet H. Zenner, Fatigue strength of welded joints under multiaxial loading: experiments and calculations, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 24, pp. 339-355, 200
- [17]Lieurade H.P., La fatigue des métaux, Institut Supérieur des Matériaux et de la Construction Mécanique, Saint Ouen, 1999
- [18]BazerguiA. et al., Résistance des matériaux, 2^e édition, Éditions de l'école Polytechnique de Montréal, Montréal, 1993, p. 593
- [19] Shigley, J.E., Mischke, C.R. Mechanical Engineering Design, 7^e édition, McGraw-Hill, 2004
- [20] MESSABIH, F.Z. (2018). Contribution à l'optimisation des paramètres de soudage des différentes zones soumises à des sollicitations cycliques de fatigue (These de doctorat). Université djillali liabés, Sidi bel Abbès, Algérie.
- [21] G. Pluvinage. « L'effet d'entaille en fatigue et en rupture ». Laboratoire de FiabilitéMécanique (LFM). Metz, France. 2003.
- [22] H. Zedira, A. B. Cracking ofwelded monoblocsofthe mechanicalshovels9210. Third Mechanical and Industrial Engineering. Amman, Jordan: [s.n.]. 1999. p. 851-869.
- [23] Maddox, Stephen (2000)."Conceptiondefatiguerégiepourlesstructuressoudées". Progrès en ingénierie structurelle et matériaux.
- [24]Weld détail fatigue life improvementtechniques, ssc- 400, August 26, 1997
- [25]L.L. MET-X, (1992). Détermination des contraintes résiduelles par diffraction des rayons X". ENSAM Paris, Paris, Document de formation générale.
- [26]H. Krause, H.-H. Jühe, (1977). Internal stresses during rolling friction and their evaluation. Wear, Volume 41, Issue 1, pp.15-23.
- [27] M. Clavel, A. Pineau. "Fatigue behaviour of two nickel-base alloys II: Physical modelling of the fatigue crack propagation process", Mat. Sci. And Engn., Vol 55: p 173-180, 1982.

[28] BENACHOUR, Mustapha, simulation de l'avancee d'une fissure de fatigue a travers un champ de contraintes résiduelles , 13décembre 2008

[29] J. Petit. "Fatigue crack growth threshold concepts". D.I. Davidson and Suresh eds. MMS AIME pub. p 3, 1984.

[30] M. Benedetti, T. Bortolamedi, V. Fontanriand, F. Frendo. "Bending fatigue behaviour of differently shot panned Al 6082 T5 alloy", International Journal of Fatigue, 26: 889-897, 2004

[31] Anne-Sophie Bilat, 2007« Estimation du risque de rupture fragile de soudures de pipelines en aciers à haut grade caractérisation et modélisation », Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris,

[32] M.ZAOUI, Juin 2000 thèse de magister « Caractérisation mécaniques et métallurgiques des joints de soudure, étude comparative entre deux procédés de soudage, le soudage MIG et le soudage au chalumeau ».

[33] 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

[34] Gerhard Biallas, Effect of welding residual stresses on fatigue crack growth thresholds, International Journal of Fatigue, Vol. 50, pp.10-17.

[35] 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),

[36] 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.

[37] Farajian, M. Welding residual stress behavior under mechanical loading. WeldWorld 57, 157–169 (2013).

[38] 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).

- [39] 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
- [40] Jean-Loup CURTAT « mémoire étude de l'effet du martelage sur la vie en fatigue de l'acier E309L utilisé pour la réparation de turbines en acier 13Cr-4Ni » le 26 Mai 2016
- [41] J. Aharter, (2006). "AFGROW users guide and technical manual: AFGROW for Windows 2K/XP". Version 4.0011.14, Air Force Research Laboratory
- [42] SERIARI, F. Z. (2023). Étude du comportement en rupture par fatigue des structures réparées par patch sous chargement variable (Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen). pp. 17–23.
- [43] Willenborg, J., Engle retardation model using an effective stress concept (Reort No. AFFDL-TR-71-1). Air Force Flight Dynamics laboratory, Wright-patterdon Air Force Base, Ohio.
- [44] P.K. Gallagher and D. A. Hughes, the effect of residual stresses on fatigue crack propagation welded structures. Journal of pressure vessel technology, vol.96, no.3, pp.214-220, 1974
- [45] BENGUEDIAB D., Etude de la propagation des fissures de fatigue sous spectres de chargement réduits. These de Doctorat, Université de Poitiers, France, 1989.