

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

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

*En : Génie Mécanique*

*Spécialité : Assemblages Soudés et Matériaux*

*Par : LAKEHAL Mohamed Abdelilah*

## Thème

# Comportement en fatigue des joints soudés par FSW en alliage d'aluminium

Soutenu publiquement, le 17/06/2025, devant le jury composé de

Président	KARA ALI Djamel	MCA	Université de Tlemcen
Encadreur	BENACHOUR Mustapha	Pr	Université de Tlemcen
Co-encadreur	SERIARI FZ	Dr	Université de Tlemcen
Examineur	BENMANSOUR Sid Ahmed	MCA	ESSAT-Tlemcen

Année Universitaire 2024/2025

## Dédicace

Je dédie ce mémoire à toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à mon parcours, à ma formation et à l'aboutissement de ce travail.

À mes parents, modèles de courage, de sagesse et de bienveillance, qui m'ont toujours soutenu avec amour et patience. Vous avez cru en moi dans les moments où moi-même j'en doutais. Votre foi en mes capacités, vos sacrifices silencieux, et votre constante présence m'ont porté durant toutes ces années. Je vous dois bien plus que des remerciements, je vous dois cette réussite.

À mes frères et sœurs et mes amis proches, pour leur soutien moral, leurs conseils avisés et leur capacité à m'écouter sans juger. Merci pour les discussions constructives, les moments de détente et cette précieuse camaraderie qui m'a permis de garder l'équilibre tout au long de ce parcours.

À mes enseignants, pour leur dévouement, leur rigueur et leurs enseignements qui ont nourri ma réflexion. En particulier, je tiens à remercier Monsieur **BENACHOUR Mustapha** pour sa disponibilité, ses conseils éclairés et sa bienveillance tout au long de ce travail.

Enfin, à moi-même, pour avoir tenu bon malgré les doutes, les échecs passagers et les nuits blanches. Ce mémoire représente plus qu'un accomplissement académique, c'est une preuve de persévérance, de discipline et de croissance personnelle.



## Remerciements

Je rends grâce à Allah, Le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la force, la volonté et la patience nécessaires à l'accomplissement de ce travail. Avant toute chose, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui, par leur soutien, leurs conseils ou leur présence, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Je remercie sincèrement Monsieur **BENACHOUR Mustapha**, pour sa disponibilité, ses remarques pertinentes et ses encouragements constants, sa bienveillance et son exigence ont été déterminants dans l'élaboration de ce travail. J'associe également mes remerciements à Madame **SERIARI FZ**, pour son soutien et sa contribution, et les membres de jury Messieurs **KARA ALI Djamel** et **BENMANSOUR Sid Ahmed**

Je tiens également à remercier l'ensemble des enseignants et membres du corps pédagogique d'Université Aboubakr Belkaïd, Je tiens également à remercier mes enseignants pour leur soutien moral particulièrement Monsieur **HADJOUI Fethi**. pour la qualité de leur enseignement, leur accompagnement tout au long de ma formation.

Je souhaite remercier chaleureusement ma famille, en particulier mes parents, pour leur amour inconditionnel, leur patience et leur confiance en moi. Leur soutien moral et affectif a été une source inestimable d'énergie et de motivation.

Mes amis, anciens et nouveaux, trouvent aussi ici toute ma reconnaissance. Merci pour votre écoute, vos encouragements, et pour avoir su me rappeler, au bon moment, qu'il est aussi important de respirer et de sourire.

A toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont croisé ma route durant ces mois de travail, je dis merci. Votre soutien a été précieux, et ce mémoire est aussi un peu le vôtre.

## Abstract

This study analyses the effects of residual stresses induced by friction-mixing (FSW) welding on the propagation of fatigue cracks in joints made of aluminum alloys. Two types of test pieces are examined: unwelded (SCR) and welded (CR) with cracks perpendicular to the weld seam. The tests are carried out under cyclic loading at constant amplitude, with load ratios  $R$  varying between 0.1 and 0.5. The influence of the ratio  $R$ , the maximum stress amplitude ( $\sigma_{max}$ ) and the residual stresses on the service life and crack propagation rate ( $da/dN$ ) is studied.

The results show that the increase of the  $R$  ratio increases the service life for unwelded specimens, but accelerates the crack propagation in the presence of residual tensile stresses. The latter, generated mainly in the mixing area and the thermomechanically affected area of the FSW joints, locally amplify the stress intensity factor ( $\Delta k$ ), thus increasing ( $da/dN$ ).

In conclusion, this study highlights the importance of mastering FSW welding parameters and post-weld treatments to optimize the durability of joints. Residual stresses, combined with the load ratio, play a major role in fatigue behaviour.

**Keywords:** Fatigue, residual stresses, crack propagation, FSW welding, aluminum alloys, load ratio.

## ملخص

تطل هذه الدراسة تأثير الضغوط المتبقية الناتجة عن اللحام بالاحتكاك والخلط (FSW) على انتشار شقوق التعب في المفاصل المصنوعة من سبائك الألومنيوم. يتم فحص نوعين من قطع الاختبار: غير ملحومة (SCR) وملحومة (CR) مع شقوق متعامدة مع خط اللحام. يتم إجراء الاختبارات تحت التحميل الدوري بسعة ثابتة، حيث تتراوح نسب الحمل R بين 0.1 و0.5. تمت دراسة تأثير النسبة R وسعة الإجهاد القصوى ( $\sigma_{max}$ ) والإجهادات المتبقية على عمر الخدمة ومعدل انتشار الشقوق ( $da/dN$ ).

أظهرت النتائج أن زيادة نسبة R تزيد من عمر الخدمة للعينات غير الملحومة، ولكنها تسرع انتشار الشقوق في وجود ضغوط الشد المتبقية. هذا الأخير، المتولد بشكل رئيسي في منطقة الخلط والمنطقة المتأثرة ميكانيكيًا حراريًا لمفاصل FSW، يعمل على تضخيم عامل شدة الإجهاد ( $\Delta k$ ) محليًا، وبالتالي زيادة ( $da/dN$ ).

في الختام، تسلط هذه الدراسة الضوء على أهمية إتقان معلمات اللحام FSW ومعالجات ما بعد اللحام لتحسين متانة المفاصل. تلعب الضغوط المتبقية، جنبًا إلى جنب مع نسبة الحمل، دورًا رئيسيًا في سلوك التعب.

**الكلمات المفتاحية:** التعب، الضغوط المتبقية، انتشار الشقوق، اللحام FSW، سبائك الألومنيوم، نسبة الحمل.

## Résumé

Cette étude analyse les effets des contraintes résiduelles induites par le soudage par friction-malaxage (FSW) sur la propagation des fissures de fatigue dans des joints en alliages d'aluminium. Deux types d'éprouvettes sont examinés : des éprouvettes non soudées (SCR) et des éprouvettes soudées (CR) avec des fissures perpendiculaires au cordon de soudure. Les essais sont réalisés sous chargement cyclique à amplitude constante, avec des rapports de charge  $R$  variant entre 0,1 et 0,5. L'influence du rapport  $R$ , de l'amplitude de contrainte maximale ( $\sigma_{max}$ ) et des contraintes résiduelles est étudiée sur la durée de vie et la vitesse de propagation des fissures ( $da/dN$ ).

Les résultats montrent l'augmentation du rapport  $R$  augmente la durée de vie des échantillons non soudés, et accélère la propagation des fissures en présence de contraintes résiduelles de traction. Ces dernières, générées principalement dans la zone de malaxage et la zone thermo-mécaniquement affectée des joints FSW, amplifient localement le facteur d'intensité de contrainte ( $\Delta K$ ), augmentant ainsi ( $da/dN$ ).

En conclusion, cette étude souligne l'importance de maîtriser les paramètres de soudage FSW et les traitements post-soudage pour optimiser la durabilité des joints. Les contraintes résiduelles, combinées au rapport de charge jouent un rôle un rôle major dans le comportement en fatigue.

**Mots-clés :** Fatigue, contraintes résiduelles, propagation des fissures, soudage FSW, alliages d'aluminium, rapport de charge.

# Sommaire

Dédicace .....	I
Remerciements .....	II
Résumé .....	V
Sommaire.....	VI
Liste des figures.....	IX
Liste des tableaux .....	XI
Liste des abreviation .....	XII
Introduction Générale .....	M
Chapitre I.....	1
I. Introduction.....	2
II. Définition de la fatigue .....	2
II.1 Différence entre fatigue à haute et bas cycle .....	3
II.2 Types de fatigue dans les matériaux .....	4
II.3 Paramètres clés de la fatigue.....	5
II.4 Mécanisme de fatigue .....	8
II.4.1 Initiation et propagation des fissures .....	8
II.4.2 Effet de la concentration des contraintes sur les matériaux.....	9
II.4.3 Lois de propagation .....	10
III. Facteurs influençant le comportement en fatigue.....	11
IV. Fatigue des joints soudés .....	12
IV.1 Procédé de soudage.....	12
IV.2 Facteurs influençant la durée de vie en fatigue des joints soudés .....	12
Chapitre II.....	16
I. Introduction.....	17
II. Généralité sur le soudage par friction-malaxage (FSW) .....	17

III.	Principes et fondamentaux du FSW .....	19
III.1	Principe .....	19
III.2	Processus du FSW.....	20
III.3	Équipement de soudage FSW .....	22
IV.	Défauts rencontrés dans les soudures .....	23
V.	Paramètres du procédé .....	24
V.1	Géométrie de l'outil FSW .....	24
V.2	Paramètre du procédé FSW .....	27
VI.	Avantages et inconvénients du soudage par friction-malaxage (FSW).....	28
VII.	Matériaux qui peuvent être soudés par friction-malaxage.....	29
VIII.	Configurations de soudage.....	32
Chapitre III .....		33
I.	Introduction.....	34
II.	Définition.....	34
III.1	Origine des contraintes résiduelles dans les soudures par FSW .....	35
III.2	Types de contraintes résiduelles .....	36
IV.	Relation entre les contraintes résiduelles et les propriétés mécaniques des joints FSW	37
V.	Techniques de mesure de contraintes résiduelles.....	38
VI.	État de l'art sur les effets de contraintes résiduelles induites par FSW.....	40
Chapitre IV .....		49
I.	Méthodologie de Prédiction et Données Expérimentales : .....	50
I.1	Introduction :.....	50
I.2	Définition de l'éprouvette SENT .....	50
II.	Description du modèle de prédiction Nasgro .....	51
III.	Matériau d'étude.....	52
IV.	Effet du rapport de charge .....	53

IV.1	Eprouvette non soudée SCR (sans contraintes résiduelles) .....	53
IV.2	Effet du rapport de charge en présence des contraintes résiduelles.....	55
V.	Effet de l'amplitude de chargement .....	59
VI.	Comparaison entre des éprouvettes avec et sans contraintes résiduelles (CR et SCR).	63
VII.	Conclusion générale et perspective .....	65
	Références .....	66

# Liste des figures

## Chapitre I

Figure 1. 1 : Allure générale d'une courbe de Wölher.....	7
Figure 1. 2 : Description des différents types de chargement en fatigue (R sigma : rapport de charge).....	7

## Chapitre II

Figure 2. 1 : Soudage par Friction Malaxage. ....	19
Figure 2. 2 : Schéma de principe du soudage par points (FSW) : a) disposition des joints bout à bout ; b) outil entrant dans la pièce et c) nomenclature de soudage. ....	21
Figure 2. 3: a) Diverses zones affectées par la chaleur et b) inclinaison de l'outil FSW (représentation exagérée).....	22
Figure 2. 4 : Vue en coupe de la microstructure d'un joint soudé par FSW. ....	23
Figure 2. 5 : Schéma montrant la position des défauts en soudage FSW en soudure bout à bout. ....	24
Figure 2. 6 : Différents types de géométrie d'épaulement et d'axe.....	26
Figure 2. 7 : Caractéristiques et géométrie du système d'outils PCBN. ....	27
Figure 2. 8 : Différents configurations de soudage. ....	32

## Chapitre III

Figure 3. 1 : Types I, II et III de contraintes résiduelles dans les matériaux monophasés et multiphasés.....	37
Figure 3. 2 : Diffraction des rayons X par un réseau cristallin.....	39
Figure 3. 3 : (b) profil des contraintes résiduelles (LD et TD signifient respectivement contrainte résiduelle longitudinale et contrainte résiduelle transversale).....	41
Figure 3. 4 : Trajectoire expérimentale de fissure sous $\lambda=1,5$ (a) BM (b) FSW (fissure perpendiculaire à la soudure) (c) FSW (fissure parallèle à la soudure).....	42
Figure 3. 5 : combinaison des composantes de contrainte résiduelle et des contraintes biaxiales dans l'échantillon cruciforme FSWed avec (a) fissure perpendiculaire à la soudure (b) fissure parallèle à la soudure.....	43
Figure 3. 6 : Surface de macrofracture d'échantillons cruciformes soumis à une charge biaxiale dans le plan ( $\lambda=1,5$ ).....	44

Figure 3. 7 : Contraintes résiduelles longitudinales obtenues par simulation numérique. ....	45
Figure 3. 8 : Évolution du point de contrainte nulle (NSP) en fonction de la vitesse d'avance. .....	45
Figure 3. 9 : Contraintes résiduelles mesurées pour l'échantillon #1.....	46
Figure 3. 10 : Contraintes résiduelles mesurées pour l'échantillon #2.....	47
Figure 3. 11 : Contraintes résiduelles longitudinales. ....	48
Figure 3. 12 : Courbes da/dN en fonction de $\Delta K$ . ....	48

## Chapitre IV

Figure 4. 1 : Éprouvette en tension fissurée sur le côté (SENT). [21].....	50
Figure 4. 2 : Distribution des contraintes résiduelles. ....	52
Figure 4. 3 : Effet du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue. ....	54
Figure 4. 4 : Effet du rapport de charge sur la vitesse de fissuration. ....	54
Figure 4. 5 : Effet du rapport de charge R sur la vitesse de propagation de fissure en fonction de l'intensité de contrainte $\Delta K$ . ....	55
Figure 4. 6 : Evolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycles pour différents rapports de charge CR_R. ....	57
Figure 4. 7 : Effet du rapport de charge sur la vitesse de fissuration en fonction de la longueur de fissure a.....	57
Figure 4. 8 : Effet du rapport de charge sur la vitesse de fissuration en fonction du facteur de l'intensité de contrainte. ....	58
Figure 4. 9 : Evolution du $K_r$ avec la longueur de la fissure.....	58
Figure 4. 10 : Variation du rapport de la charge effective avec la longueur de la fissure.....	59
Figure 4. 11 : Évolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycles pour différents niveaux de contrainte maximale.....	61
Figure 4. 12 : Évolution de la vitesse de propagation de fissure da/dN en fonction de la longueur de fissure a.....	61
Figure 4. 13 : Évolution du coefficient $Reff$ en fonction de la longueur de fissure a. ....	62
Figure 4. 14 : Évolution du facteur de fermeture $K_r$ en fonction de la longueur de fissure a. .	62
Figure 4. 15 : Evolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycles. ....	63
Figure 4. 16 : Vitesse de propagation de fissure en fonction de sa longueur. ....	64
Figure 4. 17 : Vitesse de propagation de fissure en fonction de $\Delta k$ . ....	64

## Liste des tableaux

### Chapitre II

Tableau 2.1: Comparaison du soudage par FSW avec les techniques de soudage traditionnelles. .... 18

### Chapitre IV

Tableau 4. 1 : Propriétés mécanique de l'alliage d'aluminium 2024-T3 TL. خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.

Tableau 4. 2 : Paramètres du modèle de propagation Nasgro. .... خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.

## Liste des abreviation

Symbole	Désignation	Unité
$da/dN$	: Vitesse de fissuration	m/cycle
$\sigma$	: Amplitude de contrainte	MPa
$\sigma_m$	: Contrainte moyenne	MPa
$\sigma_{Max}$	: Contrainte maximale	MPa
$\sigma_{Min}$	: Contrainte minimale	MPa
$C_{th}$	: Coefficient seuil	
$a$	: Longueur de fissure	m
$a_0$	: Longueur de fissure initiale	m
$\sigma_e$	: Limite d'endurance	MPa
$\Delta K_{th}$	: Amplitude du facteur d'intensité de contrainte seuil	MPa.Sqrt(m)
$K_{IC}$	: Le facteur d'intensité de contrainte critique	
$K_t$	: Coefficient de concentration de contrainte	
$R_{eff}$	: Rapport de charge effectif	
$N$	: Nombre de cycles	
FSW	: Procédé de soudage friction-malaxage	
HCF	: High Cycle Fatigue	
LCF	: Low Cycle Fatigue	
TWI	: The Welding Institute	
CR	: Contrainte résiduelle	
SCR	: Sans contrainte résiduelle	

## Introduction Générale

La fatigue des matériaux constitue l'une des principales causes de défaillance des structures industrielles, en particulier dans les assemblages soudés. Selon les études, près de 90 % des ruptures dans ces structures résultent de sollicitations cycliques, souvent inférieures aux limites de résistance statique des matériaux. Parmi les procédés d'assemblage, le soudage par friction malaxage (FSW) s'est imposé comme une technique innovante, notamment pour les alliages d'aluminium, grâce à ses avantages en termes de qualité des joints, de faible distorsion et de contraintes résiduelles réduites. Cependant, comme tout procédé de soudage, le FSW génère des contraintes résiduelles, dont l'impact sur la durabilité des structures reste un enjeu critique.

Ces contraintes résiduelles, qu'elles soient de traction ou de compression, influencent directement l'initiation et la propagation des fissures de fatigue. Si les contraintes de traction accélèrent la propagation des fissures en amplifiant les charges appliquées, les contraintes de compression peuvent, à l'inverse, retarder leur croissance en réduisant le facteur d'intensité de contrainte effectif. Comprendre ces mécanismes est essentiel pour optimiser la conception des assemblages soudés et garantir leur fiabilité à long terme.

L'objectif de ce travail est d'analyser systématiquement l'impact des contraintes résiduelles induites par le FSW sur la propagation des fissures de fatigue, en intégrant des paramètres clés tels que le rapport de charge ( $R$ ) et l'amplitude des contraintes appliquées. Cette étude vise à établir des corrélations entre les distributions de contraintes résiduelles, les mécanismes de propagation des fissures et la durée de vie des joints, en s'appuyant sur des données expérimentales et des modèles théoriques. Les résultats obtenus permettront de proposer des recommandations pour améliorer la résistance à la fatigue des structures soudées, en tenant compte des spécificités du procédé FSW.

Ce mémoire se structure en quatre chapitres pour explorer ces problématiques.

Le premier chapitre présente une étude bibliographique approfondie sur le comportement en fatigue des matériaux. Il aborde les mécanismes fondamentaux d'initiation et de propagation des fissures, les lois de propagation (telle que la loi de Paris), ainsi que les facteurs influençant la durée de vie, comme les concentrations de contraintes, les défauts de surface et les conditions environnementales. Une attention particulière est portée à la fatigue des joints soudés, mettant en lumière leurs vulnérabilités spécifiques.

Le deuxième chapitre se concentre sur le procédé de soudage par friction-malaxage (FSW). Il décrit ses principes, ses avantages par rapport aux techniques traditionnelles, les paramètres opératoires (vitesse de rotation, avance, géométrie de l'outil), et les défauts typiques associés. Ce chapitre souligne également l'origine des contraintes résiduelles dans les assemblages FSW, liées aux déformations plastiques et aux gradients thermiques.

Le troisième chapitre examine les effets des contraintes résiduelles sur la propagation des fissures de fatigue dans les joints FSW. Il analyse en détail l'origine, la mesure et les effets de ces contraintes sur les propriétés mécaniques des joints soudés.

Le quatrième chapitre compare le comportement en fatigue des éprouvettes avec contraintes résiduelles (CR) et sans contraintes résiduelles (SCR). Il explore l'interaction entre les contraintes appliquées et résiduelles, quantifie leur impact sur la vitesse de propagation des fissures, et discute des implications pour la prédiction de la durée de vie.

# **Chapitre I**

Etude bibliographique sur le comportement en  
fatigue

## I. Introduction

La fatigue est la principale cause de défaillance des structures et composants soudés, représentant environ 90 % des cas. Les contraintes de conception dans les structures soumises à des charges répétées sont souvent limitées par la résistance à la fatigue des soudures, qui peut être très faible. Les défaillances dues à la fatigue peuvent entraîner des conséquences graves, notamment des pertes de production, des coûts de réparation élevés, et dans les cas extrêmes, des pertes humaines. Certaines entreprises ont même dû fermer à cause de problèmes de fatigue. Une analyse des défaillances liées à la fatigue montre que la plupart d'entre elles résultent d'une conception inadéquate.

Le comportement à la fatigue des joints soudés est bien documenté, et des règles de conception détaillées existent pour de nombreuses structures. Cependant, pour appliquer ces règles de manière efficace ou pour résoudre des problèmes non couverts par ces règles, il est essentiel de bien comprendre le comportement à la fatigue des joints soudés. En particulier, il est crucial d'identifier les facteurs qui influencent le plus la résistance à la fatigue. Cette étude explore ces aspects en fournissant une introduction générale aux règles de conception pour la fatigue et aux méthodes de prédiction de la durée de vie des joints soudés.

## II. Définition de la fatigue

Le phénomène de fatigue est un processus qui, sous l'action de contraintes ou de déformations variables dans le temps, modifie les propriétés locales d'un matériau en lui causant des dommages. Cela peut entraîner la formation de fissures et éventuellement la rupture du matériau. Cette rupture est caractérisée par un niveau de contrainte inférieur à la contrainte de résistance maximale déterminée sous un chargement monotone. L'enjeu de l'étude du phénomène de fatigue est donc de pouvoir déterminer quand cette rupture dite de fatigue apparaîtra. En effet, à partir d'un certain seuil de chargement, pourtant inférieure à la charge monotone, si ce chargement variable est répété un très grand nombre de fois, la rupture finira par apparaître. Afin donc de pouvoir dimensionner en toute sécurité des structures d'ouvrages géotechniques, il serait très intéressant de pouvoir déterminer combien de temps l'ouvrage résistera au chargement variable dont il est soumis.

Cette idée introduit donc la notion de durée de vie en fatigue d'un matériau. Mais avant de développer ce point, définissons plus précisément le concept de chargement variable. La très grande majorité des systèmes mécaniques et des structures est chargée par des efforts (forces

ou résultantes, moments, déplacements) variables dans le temps. Ceux-ci créent dans les pièces des contraintes et des déformations elles-mêmes variables dans le temps de façon cyclique (et pas seulement strictement monotone comme lors d'un essai classique de traction ou compression quasi-statique). On parle alors de chargement de fatigue. (1)

## II.1 Différence entre fatigue à haute et bas cycle

- **Fatigue à faible cycle**

La fatigue à faible cycle (LCF) se produit lorsque les cycles de charge sont suffisamment importants pour provoquer une déformation plastique dans le matériau. Le nombre de cycles jusqu'à la défaillance est généralement inférieur à 10 000, et le mode de défaillance est généralement la rupture ductile. Le mécanisme principal du LCF est l'initiation et la propagation des fissures dans des régions à forte concentration de contraintes, telles que les encoches, les trous ou les défauts. Le taux de croissance des fissures dépend du facteur d'intensité de la contrainte, des propriétés du matériau et des conditions environnementales. Pour réduire le risque de LCF, vous pouvez utiliser des matériaux à haute ductilité et ténacité, appliquer des traitements anti-stress, éviter les caractéristiques nettes et contrôler l'amplitude et la fréquence de la charge.

- **Fatigue cyclique élevée**

La fatigue à cycle élevé (HCF) se produit lorsque les cycles de charge sont suffisamment petits pour provoquer une déformation élastique dans le matériau. Le nombre de cycles jusqu'à la défaillance est généralement supérieur à 10 000 et le mode de défaillance est généralement une rupture fragile. Le principal mécanisme du HCF est l'initiation et la propagation des fissures dans les régions de discontinuité microstructurale, telles que les joints de grains, les inclusions ou les limites de phase. Le taux de croissance des fissures dépend de la plage de contraintes, des propriétés du matériau et des conditions environnementales. Pour réduire le risque de HCF, vous pouvez utiliser des matériaux à haute résistance à la fatigue, appliquer des traitements de surface, améliorer la microstructure et l'homogénéité, et contrôler la plage de charge et la fréquence. (2)

## II.2 Types de fatigue dans les matériaux

La fatigue des matériaux est un phénomène qui se manifeste par la dégradation progressive d'un matériau sous l'effet de sollicitations répétées, pouvant conduire à la rupture. Voici les principaux types de fatigue : (3)

❖ Fatigue mécanique classique :

- Due à des cycles de contraintes mécaniques alternées.
- Se manifeste par la formation de fissures progressives jusqu'à la rupture.

*Exemples* : fatigue des pièces métalliques dans l'aéronautique ou l'automobile.

❖ Fatigue thermique :

- Causée par des variations cycliques de température entraînant des contraintes internes.

*Exemples* : fissuration des composants de moteurs ou des structures exposées à des cycles chaud/froid.

❖ Fatigue de contact :

- Résulte de sollicitations répétées entre deux surfaces en contact.
- Peut provoquer le piquetage de surface (pitting) ou l'usure prématurée.

*Exemples* : engrenages, roulements, rails de chemin de fer.

❖ Fatigue par corrosion (fatigue-corrosion) :

- Association des contraintes cycliques et de la corrosion chimique.
- Accélère la propagation des fissures.

*Exemples* : structures marines, pipelines, ponts métalliques.

❖ Fatigue oligo-cyclique :

- Survient sous des charges élevées et un faible nombre de cycles ( $< 10^4$  cycles).
- Conduit à des déformations plastiques importantes.

*Exemples* : pièces soumises à des charges extrêmes comme les trains d'atterrissage.

❖ Fatigue giga-cyclique :

- Observée dans des matériaux soumis à un très grand nombre de cycles ( $> 10^9$  cycles).

- Se produit même sous des faibles contraintes.

**Exemples :** composants soumis à des vibrations de longue durée (turbines, hélices).

❖ Fatigue vibratoire :

- Due aux vibrations répétées à haute fréquence.
- Provoque des microfissures internes et peut entraîner une rupture soudaine.

**Exemples :** pales d'hélicoptère, pièces de moteur soumis à des vibrations.

### II.3 Paramètres clés de la fatigue

La fatigue des matériaux désigne un processus de détérioration progressive qui survient lorsqu'un matériau est exposé à des contraintes répétées. Bien que ces contraintes restent en deçà de sa limite de résistance statique, elles peuvent entraîner, avec le temps, une rupture du matériau. Les principaux paramètres influençant ce phénomène sont les suivants :

Amplitude de contrainte ( $\sigma_a$ ) : La moitié de la différence entre la contrainte maximale ( $\sigma_{\max}$ ) et la contrainte minimale ( $\sigma_{\min}$ ) dans un cycle de chargement.

Contrainte moyenne : La moyenne des contraintes maximale et minimale dans un cycle de chargement.

Rapport de charge (R) : Le rapport entre la contrainte minimale et la contrainte maximale dans un cycle de chargement.

- 1) Nombre de cycles à la rupture (N) : Le nombre de cycles de chargement qu'un matériau peut supporter avant de se rompre.
- 2) Limite d'endurance ( $\sigma_e$ ) : La contrainte maximale qu'un matériau peut supporter pour un nombre infini de cycles sans rupture (généralement pour des matériaux ferreux, on considère  $10^6$  à  $10^7$  cycles).
- 3) Coefficient de concentration de contrainte (Kt) : Un facteur qui quantifie l'augmentation locale de contrainte due à des géométries particulières (trous, rayons, etc.).
- 4) Taux de chargement ( $d\sigma/dt$ ) : La vitesse à laquelle la contrainte est appliquée.

- 5) Température : La température à laquelle le matériau est soumis pendant les cycles de chargement.
- 6) Environnement : Les conditions environnementales (corrosion, présence de produits chimiques, etc.) auxquelles le matériau est exposé.
- 7) Microstructure du matériau : La structure interne du matériau, y compris la taille des grains, les phases présentes, et les défauts.

### ❖ Essai de fatigue

C'est un essai maintenant classique et normalisé qui consiste à appliquer à une éprouvette lisse ou entaillée de forme cylindrique ou prismatique un nombre très élevé de cycle indique de contrainte donné le nombre de cycle à rupture de l'éprouvette testée. De telles campagnes d'essai conduit sur des éprouvettes identiques et pour des cycles de contrainte de forme identique mais d'amplitude variable pour but de caractériser aussi complètement que possible la tenue dynamique d'un matériau, par la connaissance de :

- La limite de fatigue pour un cycle de contrainte de forme donnée.
- Ses limites d'endurance dans les mêmes conditions. (4)

### ❖ Courbes de Wölher

La fatigue désigne un processus d'endommagement progressif des matériaux soumis à des contraintes cycliques, dont l'amplitude reste inférieure à celle nécessaire pour provoquer une rupture quasi-statique, mais qui varient dans le temps entre une contrainte maximale ( $\sigma_{\max}$ ) et minimale ( $\sigma_{\min}$ ), pouvant mener à la rupture.

La caractérisation globale et complète du comportement en fatigue d'un matériau requiert l'établissement de courbes de Wölher qui rendent compte de l'évolution du nombre de cycles à rupture, ou durée de vie du matériau, en fonction de la contrainte maximale appliquée au cours des cycles. On distingue trois domaines (Fig. ci-après) :

- La fatigue oligo-cyclique (**LCF : Low Cycle Fatigue**) :  $\sigma_{\max}$  est voisin, voire supérieur au seuil de plasticité initial.

=> le nombre de cycles à rupture  $N_r$  est faible (typiquement  $N_r < 10^4$ )

- La fatigue longue durée (**HCF : High Cycle Fatigue**) :  $\sigma_{max}$  est inférieur au seuil de plasticité initial. On distingue :

=>le domaine d'endurance limitée : la rupture se produit sans déformation plastique généralisée et pour un nombre de cycles élevé (typiquement  $N_R$  est compris entre  $10^4$  à  $10^7$ ).

=> le domaine d'endurance illimitée :  $\sigma_{max}$  est suffisamment faible pour ne pas provoquer de rupture, même après un très grand nombre de cycles. Conventionnellement, on définit une limite de fatigue  $\sigma_D$ , elle correspond à un nombre de cycles à rupture  $N_R = 10^7$ .

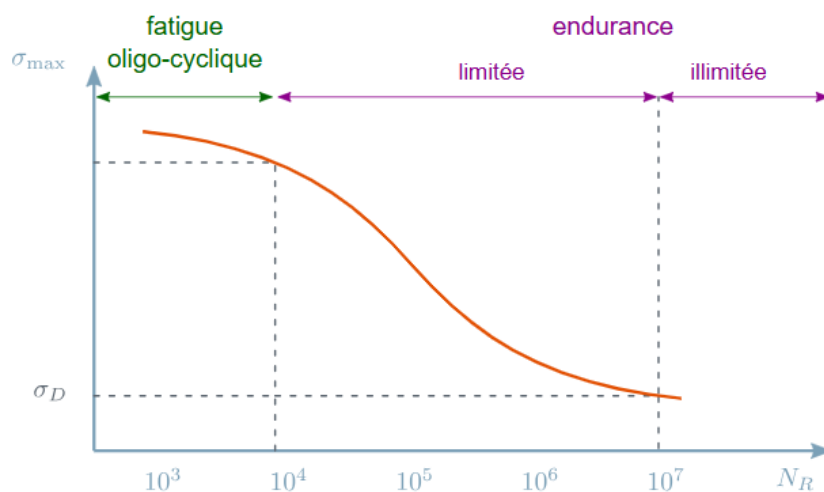


Figure 1. 1 : Allure générale d'une courbe de Wöhlér.

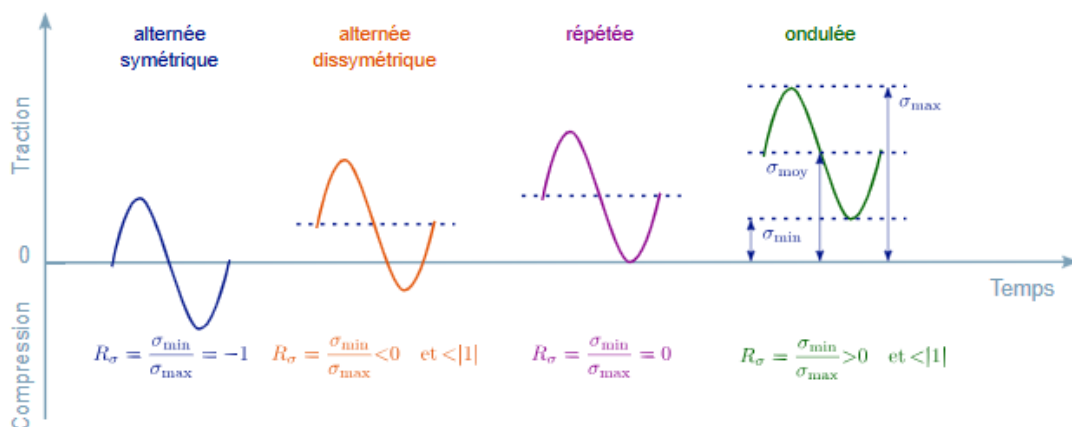


Figure 1. 2 : Description des différents types de chargement en fatigue ( $R_\sigma$  : rapport de charge)

## II.4 Mécanisme de fatigue

La fatigue est un phénomène complexe qui dépend de nombreux facteurs, tels que le type, la taille, la forme et l'emplacement de la soudure, l'historique de chargement, les propriétés du matériau, les conditions environnementales et la présence de défauts ou de concentrations de contraintes. Généralement, la fatigue se produit lorsque la contrainte appliquée dépasse la limite d'endurance du matériau, qui est la contrainte maximale qui peut être maintenue indéfiniment sans causer de dommages. Les fissures de fatigue commencent généralement au pied de la soudure, là où la contrainte est la plus élevée, et se propagent à travers la soudure ou le métal de base jusqu'à ce qu'elles atteignent une taille critique.

### II.4.1 Initiation et propagation des fissures

La fissuration par fatigue est un mécanisme majeur d'endommagement des composants structurels, résultant de contraintes cycliques inférieures à la résistance ultime ou élastique du matériau. Ce phénomène, dangereux car les contraintes restent en deçà des limites de conception et les fissures sont difficilement détectables, entraîne une rupture progressive en trois étapes :

- Initiation de la fissure
- Propagation des fissures
- Fracture rapide

Le déclenchement de fissure, parfois appelé formation de fissure, se produit dans les zones de contrainte concentrée sur la surface d'un composant et dans les zones où des défauts de surface peuvent être trouvés. Étant donné que les défauts de surface peuvent provoquer le déclenchement de fissures, l'inspection et la maintenance du composant sont essentielles pour assurer une durée de vie en fatigue aussi longue que possible. Une fois qu'une fissure s'est formée sur la surface du composant, elle commencera à se propager dans le matériau au fur et à mesure qu'il subit un nombre croissant de cycles de charge.

La propagation de fissure est mesurée en fonction du facteur d'intensité des contraintes ( $K$ ) à l'emplacement de la fissure et elle est divisée en trois étapes. Dans la première étape,  $K$  est petit et la propagation des fissures est difficile à prévoir car elle dépend de la microstructure du matériau. C'est pourquoi la fissure peut ne pas augmenter en taille du tout. Dans la deuxième étape,  $K$  augmente en valeur et le taux de propagation des fissures ne

dépend pas autant de la microstructure mais plutôt du matériau. Cette deuxième étape est la plus importante et la plus dominante du processus de fatigue. Dans l'étape finale de propagation de fissure,  $K$  est encore plus élevé et la vitesse de propagation de fissure s'accélère rapidement jusqu'à ce qu'une fracture se produise. Comme pour la première étape de propagation des fissures, la progression de la fracture dépend de la microstructure du matériau.

- La fonction de propagation des fissures est la suivante :

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

Bien qu'il ne contribue pas à la propagation de la fissure et à l'échec éventuel, la surface de la fissure sera souvent légèrement corrodée et son apparence changera. Cela permet d'identifier les différentes étapes de l'initiation et de la propagation des fissures sur la région de fracture du composant défaillant. (5)

#### ❖ Rôle des défauts de surface

Les défauts de surface, tels que la rugosité et les inclusions, jouent un rôle déterminant dans la fatigue des matériaux en favorisant l'initiation et la propagation des fissures sous charges cycliques. La rugosité crée des concentrations de contraintes aux aspérités, réduisant ainsi la résistance mécanique locale et accélérant l'apparition des fissures. Les inclusions, souvent constituées de particules étrangères ou de défauts internes exposés à la surface, agissent comme des zones de faiblesse où les contraintes se concentrent, facilitant la rupture prématurée du matériau. Ces imperfections diminuent ainsi la durée de vie en fatigue, rendant crucial l'usage de traitements de surface (polissage, grenailage, nitruration) pour améliorer la résistance des matériaux soumis à des efforts répétés.

### II.4.2 Effet de la concentration des contraintes sur les matériaux

La méthode classique de mesure de la résistance à la fatigue repose sur l'utilisation d'éprouvettes lisses soigneusement préparées. Toutefois, en pratique, les pièces mécaniques comportent souvent divers types d'encoches, tels que des épaulements, des rainures de clavette, des filets et des trous de lubrification.

Ces discontinuités entraînent une concentration des contraintes, provoquant une augmentation significative de la contrainte réelle maximale au niveau de la racine de l'encoche par rapport à la contrainte nominale de la pièce. Par conséquent, la rupture par fatigue des pièces débute fréquemment à ces endroits.

- **Facteur théorique de concentration des contraintes (Kt) :**

Dans des conditions idéales d'élasticité, le rapport entre la contrainte réelle maximale et la contrainte nominale à la racine de l'encoche est déterminé selon la théorie de l'élasticité.

- **Facteur effectif de concentration des contraintes (Kf) :**

L'évaluation de la limite de fatigue des éprouvettes lisses ( $\sigma-1$ ) et des éprouvettes entaillées ( $\sigma-1n$ ) permet de déterminer le facteur effectif de concentration des contraintes. Celui-ci dépend non seulement de la taille et de la forme de la pièce, mais aussi des propriétés physiques du matériau, des procédés de fabrication, des traitements thermiques et d'autres paramètres.

Le facteur effectif de concentration des contraintes augmente avec l'accentuation de la netteté de l'encoche, bien qu'il reste généralement inférieur au facteur théorique.

- **Coefficient de sensibilité à l'entaille (q) :**

Le coefficient de sensibilité à l'entaille traduit la réactivité du matériau aux effets de l'entaille. Il est calculé à l'aide d'une formule spécifique et sa valeur se situe entre 0 et 1. Plus cette valeur est faible, moins le matériau est sensible aux entailles.

### II.4.3 Lois de propagation

#### Loi de Paris :

La propagation des fissures de fatigue est principalement décrite par **la loi de Paris**, un modèle fondamental en mécanique de la rupture. Voici un aperçu structuré :

Loi de Paris :

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

- $da$  est le changement de la longueur de fissure.
- $dN$  est le changement du nombre de cycles de charge.
- $C$  est une constante.
- $\Delta k$  est le facteur de variation de l'intensité du stress
- $m$  est le gradient sur une échelle logarithmique double

Facteur d'intensité de stress (**K**) :

$$K = Y \sigma \sqrt{\pi a}$$

- $Y$  : Facteur de géométrie (dépend de la fissure et de la forme de l'échantillon).
- $\sigma$  : contrainte appliquée.
- $a$  : Longueur de la fissure.
- Pour chargement cyclique :

$$\Delta K = Y \Delta \sigma \sqrt{\pi a}, \Delta \sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

### III. Facteurs influençant le comportement en fatigue

#### ❖ Facteurs mécaniques :

Le mode de sollicitation a une influence déterminante sur la durée de vie en fatigue. Le premier paramètre à considérer est l'effet de la contrainte moyenne. Généralement, plus la contrainte moyenne de tension est élevée, moins longue est la durée de vie. Plusieurs relations ont été proposées afin de tenir compte de l'effet de la contrainte moyenne, dont celles de Goodman et de Soderberg. À cela, il faut également ajouter l'amplitude de contrainte. Pour une contrainte moyenne donnée, la durée de vie sera d'autant plus courte que l'amplitude totale de contrainte sera élevée. Les valeurs de contrainte moyenne et alternée conditionneront ainsi le rapport de chargement «  $R$  ». Ce dernier permet de classer les modes de sollicitation. Par exemple, le cas de chargement typique appelé « purement alterné » est désigné par  $R = -1$ , tandis que le cas de chargement dit « répété » est désigné par  $R = 0$ . (6)

#### ❖ Propriétés de fatigue S-N :

Les essais de fatigue se divisent en deux types, dont l'un mesure la contrainte nécessaire pour provoquer une rupture après un certain nombre de cycles. Cela produit une courbe S-N (contrainte vs nombre de cycles), généralement tracée sur une échelle logarithmique.

Les essais impliquent des éprouvettes soumises à des cycles jusqu'à rupture. La contrainte est réduite progressivement jusqu'à ce qu'un seuil de fatigue soit atteint, correspondant à la contrainte maximale sans rupture après un nombre donné de cycles. Certains matériaux, notamment les alliages métalliques non ferreux, n'ont pas de seuil de fatigue.

L'effet de la charge cyclique est évalué par le rapport  $R$  ( $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ ), avec un  $R$  courant de 0,1. Une variante consiste à tester sous déformation contrôlée, simulant mieux les cycles thermiques réels.

Cependant, les données S-N présentent des limites : elles ne reflètent pas toujours les conditions réelles d'utilisation, notamment en raison de la surface des composants, et elles présentent une forte dispersion. Par conséquent, un facteur de réduction est souvent appliqué pour garantir la fiabilité des conceptions.

## **IV. Fatigue des joints soudés**

### **IV.1 Procédé de soudage**

Le soudage par friction-soudure (FSW) est un procédé d'assemblage à l'état solide permettant de réaliser des assemblages de haute qualité et très résistants avec une distorsion minimale. Ce procédé permet de réaliser les assemblages bout à bout et à recouvrement courants, et s'adapte à une large gamme d'épaisseurs et de longueurs de matériaux. Face à la demande croissante d'assemblages plus résistants, économiques et performants, consommant moins d'énergie, le soudage par friction-soudure (FSW) apparaît comme une solution idéale. De plus, il offre une solution écologique à ces défis tout en étant très rapide. C'est ce qui a permis son essor rapide, depuis ses débuts jusqu'à son adoption industrielle. (7)

### **IV.2 Facteurs influençant la durée de vie en fatigue des joints soudés**

- **Influence des paramètres de soudage :**

Les paramètres de soudage, notamment la vitesse de rotation de l'outil, la vitesse d'avance, et la force d'enfoncement, jouent un rôle fondamental dans la performance en fatigue des joints soudés par FSW. Une vitesse de rotation trop élevée ou une vitesse d'avance inadéquate peut entraîner une génération excessive de chaleur, altérant la microstructure locale, ou au contraire une chaleur insuffisante, menant à une mauvaise consolidation du matériau et à la formation de défauts internes tels que des tunnels. La combinaison optimale

de ces paramètres permet de favoriser un bon malaxage du matériau, un flux homogène et une liaison métallurgique robuste entre les bords du joint, améliorant ainsi la résistance à la fatigue.

- **Effets de la microstructure locale :**

Le processus FSW génère une zone centrale très plastiquement déformée, appelée « zone de malaxage » (Stir Zone), entourée par une zone affectée thermomécaniquement (Thermo-Mechanically Affected Zone, TMAZ) et une zone affectée thermiquement (Heat-Affected Zone, HAZ). Chacune de ces régions présente une microstructure distincte, influencée par les gradients thermiques et mécaniques. Le raffinement des grains dans la stir zone, associé à une répartition homogène des précipités, contribue à une amélioration de la résistance à la fatigue. À l'inverse, des hétérogénéités microstructurales ou des gradients abrupts de dureté entre les zones peuvent engendrer des concentrations de contraintes, favorisant l'initiation des fissures de fatigue.

- **Présence de défauts de soudage :**

La présence de défauts internes tels que des cavités, des inclusions, des vides ou des tunnels est l'un des facteurs les plus déterminants de la durée de vie en fatigue des joints FSW. Ces défauts agissent comme des sites d'amorçage privilégiés pour les fissures sous chargement cyclique. Leur formation est généralement liée à une mauvaise optimisation des paramètres de soudage ou à une conception inappropriée de l'outil. Des études ont montré que la durée de vie en fatigue chute de manière significative en présence même de défauts de petite taille, ce qui souligne la nécessité de contrôles qualité rigoureux, notamment par des techniques non destructives comme la radiographie ou les ultrasons.

- **Influence de l'état de surface :**

Les surfaces rugueuses, avec leurs entailles et imperfections inhérentes, agissent comme des concentrateurs de contraintes, amplifiant les niveaux de contrainte locaux bien au-delà de la contrainte nominale appliquée.

Ces contraintes élevées localisées créent des conditions idéales pour l'apparition de fissures de fatigue, réduisant ainsi la durée de vie du matériau. Les surfaces plus lisses, en

revanche, présentent généralement une résistance à la fatigue plus élevée grâce à la probabilité réduite d'apparition de fissures.

Les traitements de surface peuvent encore améliorer la résistance à la fatigue.

- Le grenailage, par exemple, introduit des contraintes résiduelles de compression qui neutralisent les contraintes de traction subies lors des chargements cycliques, freinant ainsi efficacement la propagation des fissures.
- Les revêtements, tels que la nitruration ou la cémentation, peuvent créer une couche de surface plus dure et plus résistante à l'usure, améliorant ainsi encore la résistance à la fatigue. (8)
- **Rôle des traitements post-soudage :**

Les traitements post-soudage, qu'ils soient mécaniques ou thermiques, peuvent modifier favorablement les propriétés mécaniques du joint, notamment en fatigue. Les traitements thermiques de revenu ou de stabilisation permettent une homogénéisation microstructurale et une réduction des gradients de dureté, tandis que des traitements mécaniques tels que le shot peening ou le burnishing peuvent introduire des contraintes résiduelles compressives en surface, améliorant notablement la tenue en fatigue.

- **Contraintes résiduelles induites par le procédé :**

Le procédé FSW induit des contraintes résiduelles dans les différentes zones affectées. Ces contraintes, résultant du refroidissement différentiel entre la zone de soudure et le matériau de base, peuvent être de nature compressive ou tensile. Si les contraintes résiduelles sont de nature tensile, elles peuvent accélérer l'initiation et la propagation des fissures de fatigue. À l'inverse, des contraintes compressives en surface peuvent améliorer la résistance à la fatigue.

- **Effet des matériaux utilisés :**

Le type de matériau soudé influence également la durée de vie en fatigue. Les alliages d'aluminium, largement utilisés avec le procédé FSW, présentent une bonne soudabilité, mais leur sensibilité à l'état métallurgique post-soudage (revenue, précipitation) doit être prise en compte. Dans le cas des joints dissemblables, la différence de propriétés mécaniques (module d'élasticité, dureté, conductivité thermique) entre les matériaux peut conduire à des

distributions de contraintes non homogènes sous chargement cyclique, affectant négativement la durée de vie en fatigue. (9)

# **Chapitre II**

Procédé de soudage par FSW

## I. Introduction

Le soudage par friction (FSW) a été introduit pour la première fois en 1991. Il s'agit d'un procédé à l'état solide consistant à joindre deux pièces. Dans ce processus, les pièces métalliques ne fondent pas. Au lieu de cela, le frottement de soudage entre les pièces métalliques et l'outil FSW crée de la chaleur qui permet aux atomes des deux pièces métalliques de fusionner.

FSW, de nos jours, est largement utilisé pour le soudage des alliages d'aluminium et aussi d'autres pièces métalliques ou en alliage métallique. FSW peut être utilisé pour joindre des pièces en métal même ainsi que deux pièces métalliques différentes.

## II. Généralité sur le soudage par friction-malaxage (FSW)

### ➤ Historique du développement du procédé de soudage FSW

Le soudage par friction malaxage (FSW), inventé en 1991 par Wayne Thomas au sein du Welding Institute (TWI) au Royaume-Uni, est un procédé de soudage à l'état solide. Il utilise un outil rotatif non consommable qui génère de la chaleur par friction, ramollissant les matériaux sans les faire fondre, puis les mélange mécaniquement pour former une soudure homogène et résistante.

Adopté dans des secteurs tels que l'aérospatiale, l'automobile et la construction navale, le FSW se distingue par la qualité de ses soudures et la faible distorsion des pièces assemblées. Son développement a permis de l'appliquer à divers matériaux, dont les alliages d'aluminium, de cuivre, de titane et certains polymères.

En France, l'Institut de Soudure a contribué à son essor, en s'équipant dès 2000 d'un premier dispositif en partenariat avec EADS, suivi en 2004 d'un second portique de plus grande capacité. Ces initiatives ont favorisé des avancées majeures, notamment pour les réservoirs cryogéniques du lanceur Ariane 6.

### ➤ Comparaison du soudage par FSW avec les techniques de soudage traditionnelles

Le soudage par friction malaxage (FSW - Friction Stir Welding) est une technique innovante qui se distingue des méthodes traditionnelles comme le soudage à l'arc (MIG, TIG, SMAW), le soudage par résistance (spot welding) et le soudage laser. Voici une comparaison selon plusieurs critères :

Tableau 2. 1: Comparaison du soudage par FSW avec les techniques de soudage traditionnelles.

Critères	Soudage par FSW	Soudage traditionnel (MIG, TIG, SMAW, etc.)
Principe	Utilisation d'un outil rotatif qui génère de la chaleur par friction et plastifie le métal sans fusion	Fusion du métal par une source de chaleur externe (arc électrique, flamme, laser, etc.)
Température	Température inférieure au point de fusion du matériau	Température élevée, supérieure au point de fusion
Matériaux adaptés	Principalement pour l'aluminium, le cuivre, les alliages légers	Tous types de métaux (acier, inox, aluminium, titane, etc.)
Qualité du joint	Excellente, sans porosités ni fissures liées à la solidification	Risque de fissures, porosités, inclusions
Déformation	Minimale grâce à une faible chaleur d'entrée	Importante, surtout pour les matériaux fins
Résistance mécanique	Très élevée, proche du matériau de base	Peut-être affaiblie par des défauts métallurgiques
Productivité	Élevée, car pas de consommables ni de préparation complexe	Dépend de la technique, mais souvent plus lente pour les matériaux épais
Environnement & Sécurité	Pas de fumée, pas d'ultraviolets, pas de projections	Fumées toxiques, rayonnement UV, nécessité d'équipements de protection
Consommables	Aucun (seulement l'outil qui peut être réutilisé)	Electrodes, gaz de protection, fils d'apport, flux
Coût initial	Élevé (machines spécifiques)	Plus accessible pour des équipements standards
Automatisation	Très adaptée à l'automatisation et la robotisation	Variable selon les procédés, mais souvent plus manuel

### III. Principes et fondamentaux du FSW

#### III.1 Principe

Le soudage par friction-malaxage (FSW) est une technique d'assemblage à l'état solide qui emploie un outil rotatif non consommable, équipé d'une sonde et d'un épaulement spécifiquement conçus pour joindre deux pièces placées face à face. L'outil pénètre les bords en contact des pièces à assembler et se déplace le long de la ligne de jointure, produisant de la chaleur par friction et créant une zone ramollie autour de l'outil. Ce procédé mélange les matériaux des deux pièces et forge le métal chauffé et ramolli grâce à la pression mécanique appliquée par l'outil, similairement à la manière dont on manipule de l'argile ou de la pâte. Ainsi, le FSW permet de réaliser des soudures solides et continues sans nécessiter la fusion des matériaux de base.

Le FSW est principalement utilisé pour l'assemblage de l'aluminium corroyé ou extrudé, notamment dans des structures exigeant une grande résistance de la soudure. Il est également efficace pour assembler divers matériaux, tels que les alliages d'aluminium, de cuivre, de titane, l'acier doux, l'acier inoxydable et les alliages de magnésium. De plus, cette méthode a été appliquée avec succès pour le soudage de polymères et pour l'assemblage de métaux dissemblables, comme les alliages d'aluminium et de magnésium. Cette technique est largement répandue dans des secteurs industriels tels que la construction navale, la fabrication de trains et les applications aérospatiales.



Figure 2. 1 : Soudage par Friction Malaxage.

### III.2 Processus du FSW

En soudage par friction-malaxage (FSW), un outil rotatif non consommable est employé pour assembler deux pièces. Cet outil se compose de trois éléments : la tige, l'épaulement et la goupille (Fig. 2.2a). La tige assure la liaison entre l'outil et la machine FSW, tandis que l'épaulement, en frottant contre les pièces, génère la chaleur par friction requise. La goupille, quant à elle, s'insère dans la ligne de soudure entre les pièces (Fig. 2.2a, b). Cette insertion résulte de la force exercée vers le bas ainsi que de la rotation de la goupille.

La phase de plongée est cruciale dans le processus FSW, car elle initie les conditions thermomécaniques nécessaires au soudage. Une fois que la goupille a pénétré complètement dans la pièce, l'épaulement intensifie le chauffage par friction, assouplissant le matériau sans le faire fondre. La pénétration de l'outil provoque une déformation plastique et un frottement, générant ainsi une chaleur supplémentaire. Le matériau plastifié est maintenu par l'épaulement et s'écoule autour de la goupille sous l'effet du malaxage (Fig. 2.2c).

La zone située à droite de l'outil, où le sens de rotation et la direction de déplacement sont identiques, est appelée le côté avançant. Dans cette zone, le matériau tend à refluer, mais la rotation de l'outil s'y oppose. À l'inverse, la partie gauche, où la direction de déplacement et la rotation sont opposées, est désignée comme le côté reculant. Ici, l'écoulement du matériau est facilité par la rotation de la broche.

Au fur et à mesure de l'avancement de l'outil, celui-ci entre en contact avec du matériau froid sur son bord d'attaque (face avant), qui est ensuite projeté vers le côté reculant, influençant ainsi l'écoulement du matériau et la formation de pépites. Le bord arrière de l'outil continue quant à lui d'alimenter la zone de soudure en chaleur par friction, ce qui joue un rôle dans la microstructure de la soudure.

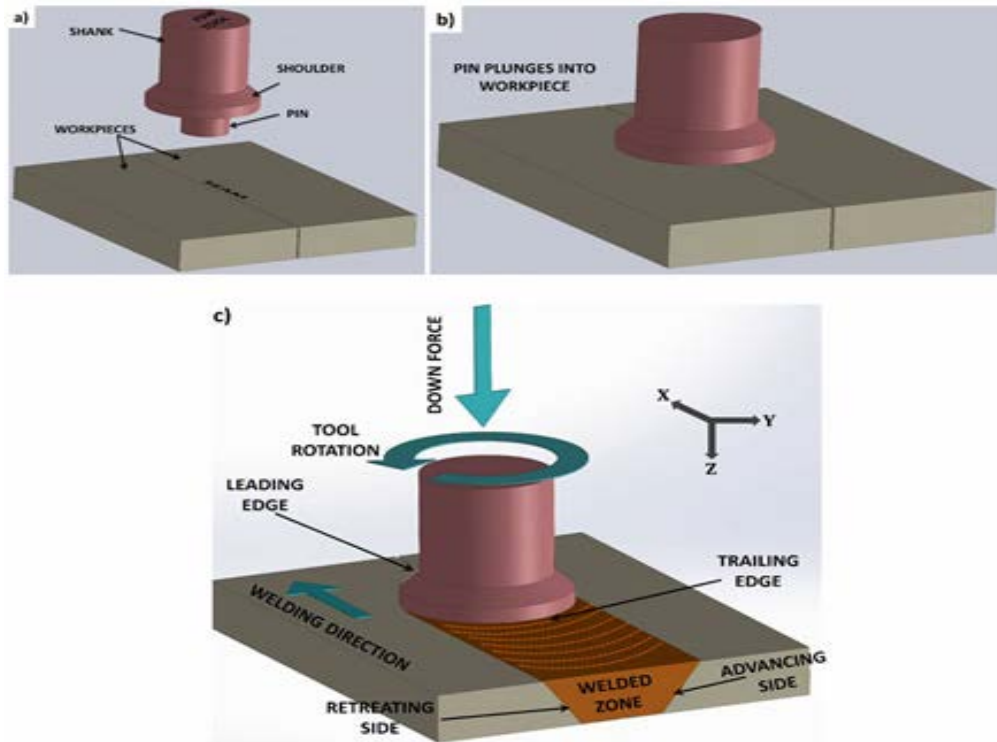


Figure 2. 2 : Schéma de principe du soudage par points (FSW) : a) disposition des joints bout à bout ; b) outil entrant dans la pièce et c) nomenclature de soudage.

Pendant le processus de soudage, la pièce en contact avec l'outil peut être divisée en plusieurs zones (Fig. 2.3a). D'abord, le matériau situé devant l'outil est préchauffé avant de subir une première déformation. Ensuite, sous l'épaule et à proximité de la broche, il subit une intense déformation plastique et est extrudé par la goupille. L'épaule forge la pièce en s'appuyant sur l'inclinaison de la broche. Enfin, le matériau refroidit à mesure qu'il quitte la zone d'influence de l'outil. Ce cycle se répète continuellement au fur et à mesure que l'outil progresse le long de la ligne de soudure.

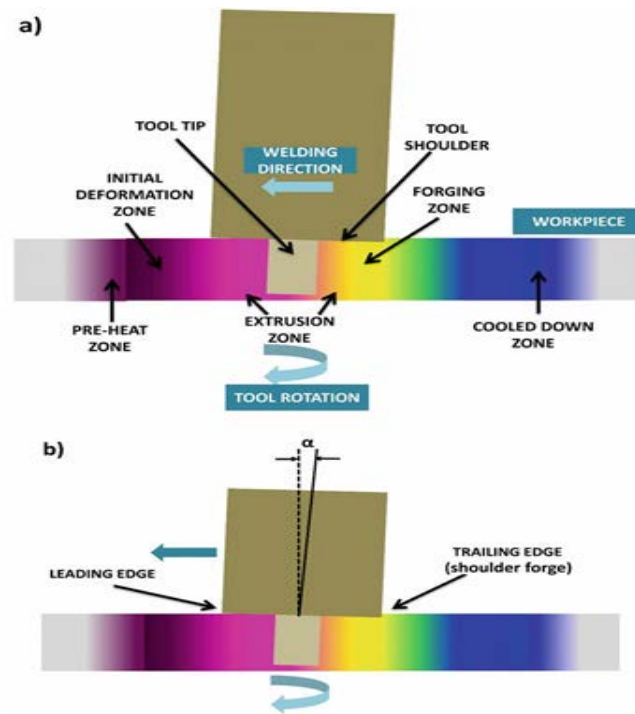


Figure 2. 3: a) Diverses zones affectées par la chaleur et b) inclinaison de l'outil FSW (représentation exagérée).

### III.3 Équipement de soudage FSW

Les principaux composants d'un système de soudage FSW incluent :

- Machine de soudage FSW : Il peut s'agir d'une fraiseuse modifiée, d'un robot ou d'une machine spécialisée conçue pour le FSW. Ces machines doivent être capables de supporter les forces élevées générées pendant le processus et de maintenir une précision de positionnement élevée.
- Outil de soudage FSW : Composé d'un épaulement et d'un pion (ou broche), l'outil est généralement fabriqué en acier rapide ou en carbure de tungstène pour résister aux températures et aux forces élevées. La géométrie de l'outil, y compris la forme du pion et de l'épaulement, joue un rôle crucial dans la qualité de la soudure.
- Système de serrage et de maintien : Les pièces à assembler doivent être solidement fixées pour éviter tout mouvement pendant le soudage. Un système de serrage efficace est essentiel pour prévenir les défauts et assurer une soudure uniforme.
- Système de commande : Un contrôle précis des paramètres de soudage, tels que la vitesse de rotation et la vitesse d'avance, est essentiel pour obtenir des soudures de qualité. Les systèmes de commande modernes permettent un ajustement en temps réel de ces paramètres. (1)

#### IV. Défauts rencontrés dans les soudures

On distingue plusieurs types de défauts spécifiques au soudage par friction malaxage. Ces défauts peuvent être dimensionnels ou internes, résultant d'une mauvaise répartition du métal et des oxydes présents à la surface du joint. Bien que le FSW génère des distorsions et des contraintes résiduelles, celles-ci restent nettement inférieures à celles induites par le soudage par fusion.

Les défauts observés proviennent principalement de paramètres de soudage inappropriés, tels que :

- Des vitesses d'avance et de rotation inadéquates ;
- Un mauvais choix d'outil ;
- Une force axiale mal réglée ou mal contrôlée ;
- Un maintien insuffisant des pièces.

La figure 2.4 illustre la microstructure d'un joint soudé, mettant en évidence les différentes zones :

- Zone malaxée (ZM).
- Zone affectée thermo-mécaniquement (ZATM).
- Zone affectée thermiquement (ZAT).
- Métal de base (MB).

C'est au sein de la ZM que l'on observe des alignements d'oxydes pouvant altérer les propriétés mécaniques du joint. La figure 2.5, quant à elle, localise les différents types de défauts liés au procédé. Toutefois, lorsque les paramètres de soudage préalablement qualifiés sont rigoureusement contrôlés, le procédé se révèle très fiable et répétitif, minimisant ainsi l'apparition de ces défauts. (2)

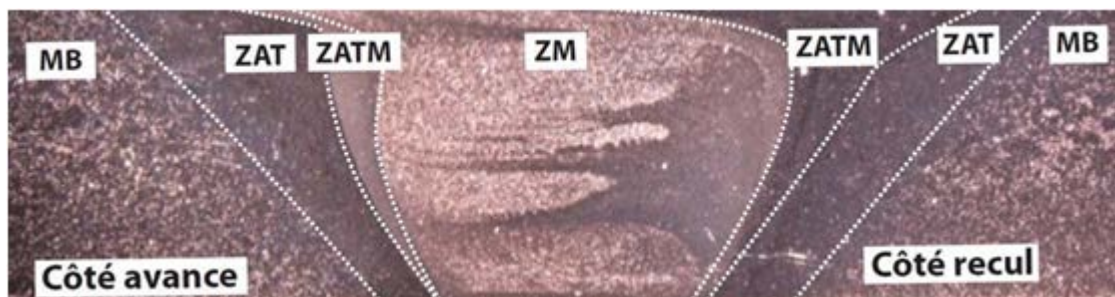


Figure 2. 4 : Vue en coupe de la microstructure d'un joint soudé par FSW.

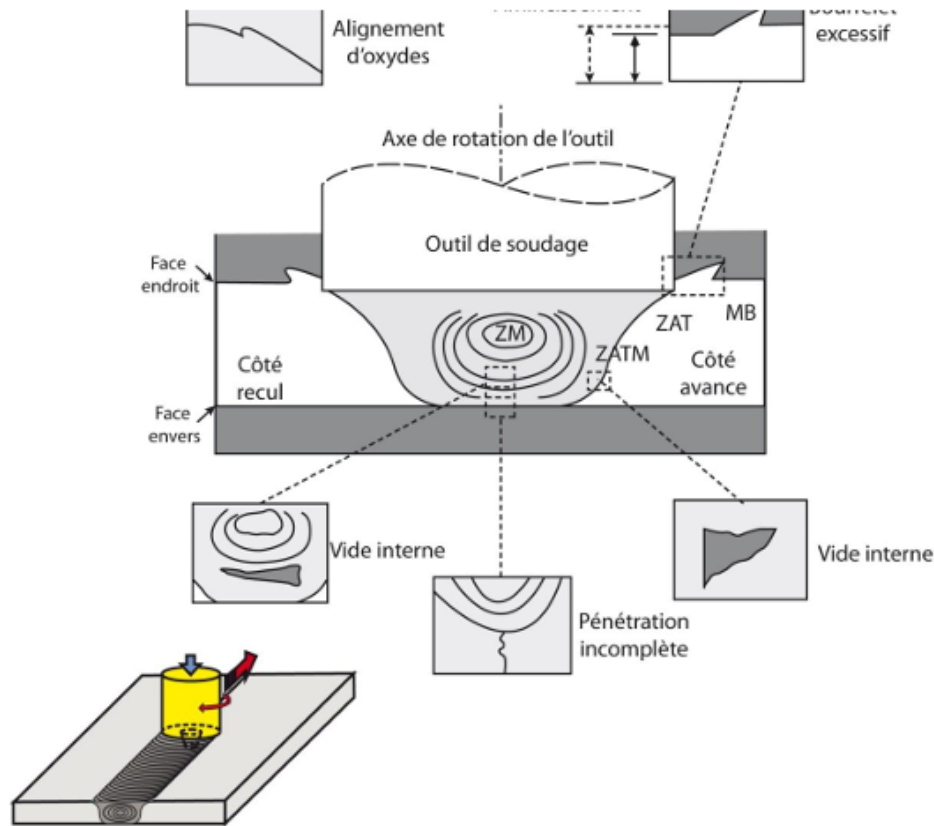


Figure 2. 5 : Schéma montrant la position des défauts en soudage FSW en soudure bout à bout.

## V. Paramètres du procédé

Le soudage FSW/FSP implique des mouvements complexes du matériau et une déformation plastique. Les paramètres de soudage, la géométrie de l'outil et la conception des joints influencent significativement le flux de matière et la distribution de température, influençant ainsi l'évolution microstructurale du matériau. Cette section aborde quelques facteurs majeurs affectant le procédé FSW, tels que la géométrie de l'outil, les paramètres de soudage et la conception des joints.

### V.1 Géométrie de l'outil FSW

Le taux de génération de chaleur, la force transversale, le couple et l'aspect thermomécanique des expériences dépendent de la géométrie de l'outil. Cette géométrie influence également l'écoulement du matériau (plastifié) dans la pièce. Le diamètre et la surface de l'épaulement, sa forme, sa taille, la nature de la surface de l'outil et la géométrie de

la broche sont des facteurs qui influencent la qualité du soudage. Le choix d'un épaulement et d'une géométrie de broche appropriés est également compliqué par les facteurs suivants :

- Dimensions de la pièce, qui déterminent sa capacité à agir comme dissipateur thermique.
- Efficacité de l'assemblage requis.
- Forces attendues sur l'outil pour résister aux défaillances mécaniques.

- **Diamètre de l'épaulement et caractéristiques de surface :**

Le diamètre de l'épaulement de l'outil FSW est un paramètre clé, car il détermine la quantité de chaleur générée par frottement entre l'outil et la pièce à souder. L'épaisseur de la pièce influe sur le choix du diamètre de l'épaulement : plus la pièce est épaisse, plus il faut de chaleur pour ramollir le matériau, nécessitant un épaulement plus large. Une grande pièce agit aussi comme un dissipateur thermique, augmentant le besoin en chaleur.

La chaleur peut également être ajustée en modifiant la vitesse de rotation de l'outil ou en réduisant la vitesse d'avance. Un diamètre d'épaulement adapté améliore la qualité du joint.

Les caractéristiques de la surface de l'épaulement influencent aussi la soudure. Il existe trois formes principales (Fig. 2.6) :

- ✓ Épaulement plat : Facile à fabriquer, mais provoque un excès de matériau (flash) et nécessite une inclinaison de l'outil.
- ✓ Épaulement concave : Couramment utilisé, il retient mieux le matériau plastifié.
- ✓ Épaulement convexe : Peut traiter des plaques de différentes épaisseurs ou avec des défauts de planéité. Cependant, il déplace le matériau hors de la zone de soudure.

Pour limiter ce déplacement, des motifs comme des spirales, rainures ou stries sont ajoutés, augmentant la friction et améliorant le mélange des matériaux ramollis. L'utilisation d'un épaulement convexe avec spirales en mode de contrôle de force permet de maintenir une profondeur de pénétration constante en s'adaptant aux variations de contact entre l'outil et la pièce.

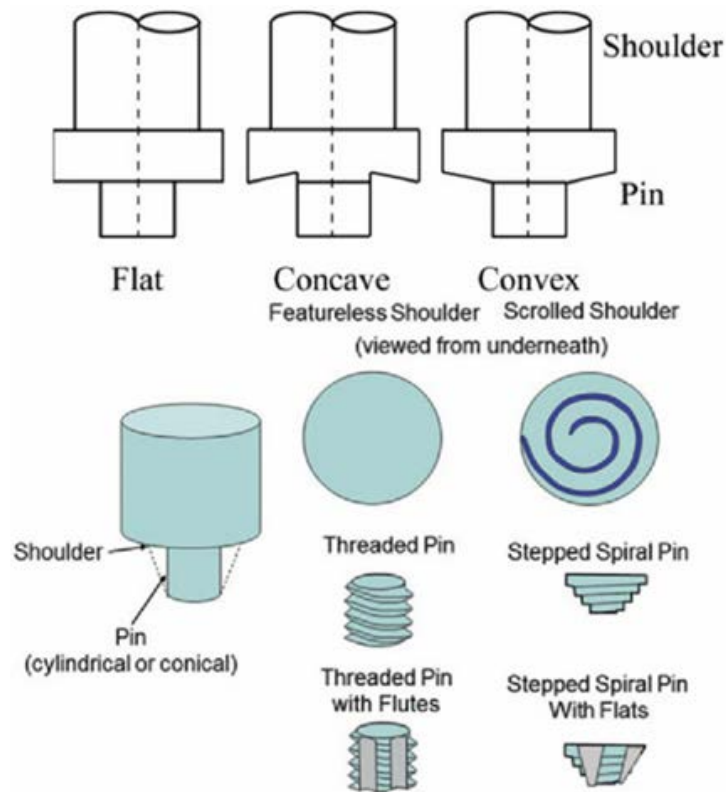


Figure 2. 6 : Différents types de géométrie d'épaulement et d'axe.

- **Géométrie et caractéristiques du pion :**

Le pion joue un rôle crucial en soudage par friction-soudure (FSW) en pénétrant dans la pièce et en mélangeant le matériau ramolli. Sa forme et sa taille influencent directement la qualité de la soudure.

Longueur du pion : Elle est légèrement inférieure à l'épaisseur de la pièce à souder, généralement entre 0,85 et 0,95 fois cette épaisseur.

Diamètre du pion : Un petit diamètre réduit la zone dangereuse mais augmente la fragilité. En règle générale, il représente environ 1/3 du diamètre de l'épaulement.

Forme du pion :

- Cylindrique : N'entraîne pas de poussée vers le bas du matériau.
- Tronconique : Génère une force de décharge, favorisant l'écoulement du matériau vers le bas, utile pour les matériaux à haute température.

Caractéristiques additionnelles : Des éléments comme goujures et méplats améliorent l'écoulement du matériau et le fragmentent.



Figure 2. 7 : Caractéristiques et géométrie du système d'outils PCBN.

## V.2 Paramètre du procédé FSW

- **Influence de la vitesse de l'outil FSW**

Il existe deux types de vitesse pour l'outil FSW, comme la vitesse de rotation et la vitesse de translation. Il est très important de choisir ces paramètres de vitesse avec soin afin de rendre le cycle de soudage plus efficace.

Le matériau de la pièce doit être suffisamment chaud pour que moins de force soit nécessaire pour réaliser la liaison. Une rotation plus rapide et un déplacement plus lent de l'outil entraîneront une production élevée de chaleur.

Si le matériau est trop froid ou trop chaud, il y aura des défauts dans la pièce finale. Ainsi, la chaleur devrait être à un niveau optimal. Pour atteindre ce niveau optimal, la vitesse de rotation et la vitesse de translation doivent être optimisées.

- **Contrôle du préchauffage et surveillance de la température**

Certaines études suggèrent que le contrôle de la température pendant le processus de soudage a un effet significatif sur les propriétés mécaniques des joints soudés par FSW. Par conséquent, un système de contrôle du préchauffage est intégré dans le processus FSW, qui se compose d'un ensemble de résistances qui contrôlent la température à travers un limiteur de courant. En outre, la température des plaques PP est directement surveillée à l'aide d'un thermocouple.

## VI. Avantages et inconvénients du soudage par friction-malaxage (FSW)

### ❖ **Avantage :**

- Procédé à l'état solide : Évite les défauts de solidification (porosité, phases indésirables) typiques du soudage par fusion.
- Faible distorsion et contraintes résiduelles : Moins de chaleur générée réduit les déformations et les tensions dans les pièces soudées.
- Propriétés mécaniques améliorées : Microstructure à grains fins offrant une meilleure résistance des joints, durée de vie en fatigue et résistance à la corrosion.
- Efficacité énergétique : Consommation d'énergie réduite par rapport au soudage par fusion, diminuant les coûts opérationnels.
- Pas de consommables : Aucun besoin de métaux d'apport ou de gaz de protection, réduisant les coûts et l'impact environnemental.
- Polyvalence : Adapté à une large gamme de matériaux, y compris les assemblages de métaux dissemblables.
- Sécurité améliorée : Pas d'arc électrique ou de bain de fusion, limitant les risques liés aux fumées, éclaboussures et UV.
- Facilité d'utilisation : Automatisation simple sur fraiseuses, utilisable dans toutes les positions sans bain de soudure.

### ❖ **Inconvénients :**

- Forces descendantes importantes : Nécessité de maintenir une pression élevée pour maintenir les pièces ensemble.
- Trou de sortie : Un petit trou reste à la fin de la soudure, nécessitant parfois un usinage supplémentaire.
- Défauts en trou de serrure : Peuvent apparaître, surtout avec des matériaux épais ou des paramètres non optimisés.
- Usure de l'outil : L'outil rotatif s'use et doit être remplacé ou réparé régulièrement.
- Vitesse de déplacement lente : Plus lent que certains procédés de soudage par fusion, bien que compensé par un nombre réduit de passes.
- Investissement initial élevé : Coût important de l'équipement et des outils, surtout pour les petites opérations.
- Limites de taille et de géométrie : Inadapté pour certaines formes complexes ou pièces de grande taille.

## VII. Matériaux qui peuvent être soudés par friction-malaxage

Le soudage par friction-malaxage (FSW) est une technique largement utilisée pour assembler divers matériaux, notamment ceux qui sont difficiles à souder avec les méthodes de soudage par fusion traditionnelles. Voici quelques matériaux pouvant être soudés par ce procédé :

- ✓ *Alliages d'aluminium :*
  - Séries 2xxx (Al-Cu)
  - Séries 5xxx (Al-Mg)
  - Séries 6xxx (Al-Mg-Si)
  - Séries 7xxx (Al-Zn)
  - Alliages d'aluminium moulés

Le FSW a été initialement développé pour les alliages d'aluminium, souvent problématiques avec les méthodes classiques en raison de la fissuration à chaud et de la porosité. Il est particulièrement adapté aux applications aérospatiales, où ces alliages sont couramment utilisés. Les pièces soudées par FSW présentent des propriétés mécaniques supérieures à celles obtenues par d'autres techniques.

- ✓ *Acier :*

Bien que le FSW soit principalement utilisé pour les matériaux non ferreux, il est également applicable à certains aciers, tels que l'acier inoxydable, l'acier doux et certains aciers à haute résistance. Cette méthode minimise la production de chaleur, ce qui est avantageux pour les alliages sensibles à la température. Les pièces en acier soudées par FSW présentent moins de défauts, rendant leur production plus économique.

- ✓ *Alliages de magnésium :*

Les alliages de magnésium, difficiles à souder par fusion en raison de leur réactivité et de leur tendance à former des oxydes, peuvent être efficacement assemblés par FSW. Cette technique permet de surmonter ces défis, facilitant ainsi le soudage de ces matériaux.

✓ *Alliages de titane :*

Bien que d'autres méthodes de soudage puissent être utilisées pour le titane, elles entraînent souvent des problèmes de qualité ou de déformation. Le FSW, en revanche, évite ces écueils et est considéré comme une solution optimale pour le soudage des alliages de titane.

✓ *Alliages de cuivre :*

En raison de leur haute conductivité électrique et thermique, le soudage du cuivre et de ses alliages était traditionnellement complexe. Le FSW permet désormais de réaliser ces assemblages tout en offrant de bonnes propriétés mécaniques dans la zone soudée.

✓ *Matériaux dissemblables :*

Le FSW se distingue par sa capacité à assembler des matériaux de nature différente, comme des alliages d'aluminium et de magnésium, ou des alliages d'aluminium de compositions variées.

✓ *Matériaux polymères :*

Bien que moins courant que pour les métaux, le FSW peut également être utilisé pour assembler des thermoplastiques dans certaines applications.

✓ *Hafnium et Zirconium :*

Ces matériaux, utilisés dans des secteurs comme la production d'énergie, le raffinage du pétrole et la pétrochimie, peuvent être efficacement soudés par FSW. Cette méthode permet un assemblage fiable et économique des pièces en hafnium ou en zirconium.

### ❖ **Applications du procédé de soudage FSW**

Le soudage FSW est largement utilisé dans de nombreuses industries pour joindre divers composants métalliques. Les industries suivantes utilisent le soudage par friction en raison de ses avantages :

- Industrie automobile :

De nombreux composants dans l'industrie automobile tels que les moteurs, les boîtes de batterie, les cadres de moteur d'automobile, le convertisseur DC / DC, le gonfleur d'airbag, etc. nécessitent FSW. Les gonfleurs d'airbag entièrement chargés peuvent être facilement soudés en raison de la zone étroite affectée par la chaleur du soudage FSW.

- Industrie des réseaux et des communications :

Diverses pièces d'appareils de télécommunication, composants de communication 5G, etc. nécessitent un soudage par friction pour joindre deux parties. De nombreuses entreprises de soudage par friction à remuer dans le monde fabriquent des pièces pour cette industrie.

- Industrie aérospatiale :

Dans l'industrie aérospatiale, un rotor à faible compression est joint à un tube par le procédé de soudage par friction. Les engrenages de grappe et de nombreux autres composants dans cette industrie nécessitent également le soudage par friction.

- Industrie maritime :

De nombreux grands et petits projets dans l'industrie marine utilisent le soudage par friction pour accélérer la construction. Cela permet de gagner beaucoup de temps et d'augmenter les profits. Les exemples où la FSW est nécessaire dans cette industrie sont les revêtements de sol, le pont, les ponts, les rideaux d'eau, les panneaux, les cloisons, les passerelles, etc.

- Industrie agricole :

De nombreux composants dans l'industrie agricole tels que les pompes à eau, les engrenages des pompes à eau, les moteurs diesel, etc. ont besoin de FSW. Les entreprises de soudage par friction peuvent réduire considérablement les coûts des composants agricoles pour l'industrie agricole.

## VIII. Configurations de soudage

Il existe une diversité de configurations de soudage couramment utilisées dans le secteur industriel, illustrées à la figure 2.8. Certaines de ces configurations présentent un degré de complexité plus élevé, nécessitant l'emploi de dispositifs de bridage appropriés afin d'assurer le maintien des pièces en position et leur contact mutuel. La configuration dite « en bout à bout » (figure 2.8 (5-1)) se distingue par l'optimisation du gain de poids, en raison de l'absence de tout recouvrement de matière. Toutefois, en fonction des tolérances dimensionnelles des pièces, une légère disparité d'épaisseur entre les deux tôles peut apparaître. Cela a pour conséquence de désaligner légèrement l'axe du robot de soudage par rapport à la normale des surfaces à assembler, ce qui peut engendrer des imprécisions lors de l'exécution du soudage. En revanche, les configurations par recouvrement (figure 2.8(5-3) et figure 2.8(5-4)), bien qu'exemptes de ce type d'inconvénient, n'offrent pas les mêmes avantages en termes de réduction de masse. (3)

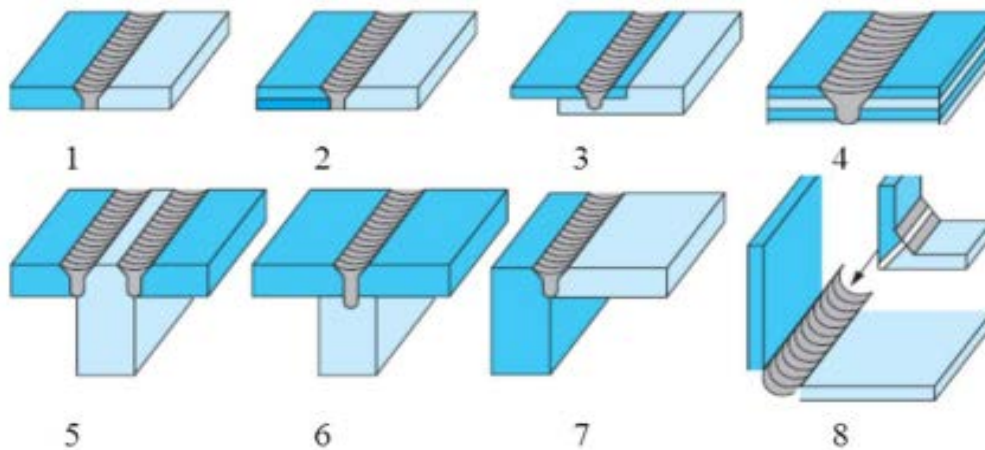


Figure 2. 8 : Différents configurations de soudage.

# **Chapitre III**

Effets des contraintes résiduelles dues au soudage par FSW sur la propagation des fissures de fatigue

## **I. Introduction**

Le soudage par friction-malaxage (FSW) est une technique innovante largement utilisée pour l'assemblage des alliages légers, notamment l'aluminium. Cependant, ce procédé engendre des contraintes résiduelles qui influencent significativement le comportement mécanique des joints soudés. En particulier, ces contraintes peuvent affecter la propagation des fissures de fatigue, un facteur clé dans la durabilité des structures soudées.

Les contraintes résiduelles peuvent amplifier dangereusement les contraintes appliquées, augmentant ainsi le risque d'initiation et de propagation des fissures. Inversement, des précontraintes de compression peuvent améliorer la tenue en fatigue en retardant la propagation des fissures. Toutefois, ces contraintes résiduelles ne peuvent pas être mesurées directement ; elles sont déduites par des méthodes indirectes telles que l'analyse des déformations macroscopiques, la diffraction des rayons X, la mesure de la vitesse des ondes ultrasonores ou encore l'étude des caractéristiques magnétiques du matériau.

Dans ce contexte, il est essentiel de comprendre l'influence des contraintes résiduelles générées par le FSW sur la propagation des fissures de fatigue, afin d'optimiser la conception et la durabilité des structures soudées.

## **II. Définition**

Les contraintes résiduelles sont des contraintes situées à l'intérieur des matériaux, même sans forces extérieures et avec des températures constantes et uniformes.

Ces contraintes, aussi bien que les contraintes d'exercice, comportent des variations dans la stabilité du système en modifiant à la fois dimension, résistance à la fatigue et à la rupture. Les contraintes résiduelles, qui se développent normalement dans le composant pendant les processus de fabrication et d'usinage, peuvent se combiner avec les charges d'exercice, en accélérant la vitesse d'augmentation des défauts et en portant à la rupture prématurée et souvent catastrophique de la partie.

### **III. Contraintes résiduelles de soudage**

Le soudage est un procédé d'assemblage de deux ou plusieurs pièces métalliques pour former un seul produit. Il permet d'obtenir un joint solide et résistant, plus résistant que les autres méthodes de collage des métaux. Le soudage implique une production localisée de chaleur provenant d'une source de chaleur en mouvement. Les structures soudées chauffent rapidement jusqu'à la température de fusion, puis refroidissent rapidement, ce qui entraîne des altérations microstructurales et des propriétés, générant des contraintes résiduelles. Ces contraintes résiduelles résultent de la dilatation et de la compression non uniformes de la soudure et du matériau de base, dues à la répartition irrégulière de la chaleur pendant le soudage.

La majorité des contraintes résiduelles présentes dans les assemblages soudés sont de nature tractionnelle et peuvent avoir des effets délétères sur l'intégrité des composants. Néanmoins, des études récentes ont mis en évidence que les contraintes résiduelles de compression peuvent, dans certains cas, contribuer positivement à la performance des structures soudées. En effet, les contraintes de traction tendent à favoriser l'initiation et la propagation de fissures, tandis que les contraintes de compression peuvent améliorer la résistance mécanique et la durabilité des composants.

Les principales origines des contraintes résiduelles générées lors du soudage sont le retrait thermique, les effets de trempe et les transformations de phase. Les contraintes de traction sont principalement induites par le retrait du matériau lors du refroidissement, tandis que les contraintes de compression résultent des effets combinés de la trempe et des transformations de phase. Ces contraintes, bien que présentes simultanément dans un même composant, se répartissent de manière hétérogène en fonction des zones concernées.(1)

#### **III.1 Origine des contraintes résiduelles dans les soudures par FSW**

En générale les contraintes résiduelles peuvent être introduites par divers processus, notamment :

- Soudage : Gradients de température et déformations plastiques non uniformes.
- Usinage : Déformations plastiques locales dues à l'enlèvement de matière.
- Traitements thermiques : Transformations de phase ou gradients de température.

- Grenailage : Contraintes résiduelles de compression appliquées à la surface.

Les contraintes résiduelles dans les soudures par FSW proviennent principalement de deux mécanismes : *les déformations plastiques et les gradients thermiques*.

Origine des Contraintes Résiduelles dans le FSW :

- **Déformations Plastiques** : Lors du FSW, le matériau est soumis à des forces mécaniques importantes dues à l'outil de friction qui tourne et pénètre dans le matériau. Cela entraîne des déformations plastiques, surtout dans la zone de soudure et à ses abords, ce qui peut générer des contraintes résiduelles.
- **Gradients Thermiques** : Bien que le FSW soit un procédé à basse température par rapport aux techniques de soudage par fusion, il génère néanmoins des gradients thermiques. Ces gradients provoquent une expansion et une contraction non uniformes du matériau, contribuant ainsi aux contraintes résiduelles.
- **Compression Mécanique** : L'outil utilisé dans le FSW applique une pression mécanique sur le matériau, ce qui peut également contribuer à la formation de contraintes résiduelles compressives, notamment dans la zone thermiquement affectée (TMAZ) et la zone de soudure (SZ).

### III.2 Types de contraintes résiduelles

Il existe trois types de contraintes résiduelles :

- **Les contraintes résiduelles de type I** représentent les contraintes résiduelles moyennes agissant dans toutes les phases et cristallites du volume du matériau macroscopique. Ces contraintes résiduelles résultent d'incompatibilités de déformation longue introduites, par exemple, par des gradients de déformation ou de température lors d'un procédé de fabrication.
- **Les contraintes résiduelles de type II** décrivent l'écart moyen par rapport au niveau de contrainte résiduelle macroscopique d'une cristallite individuelle (matériau monophasé). Ces contraintes varient à l'échelle d'un grain individuel ; on peut s'attendre à ce qu'elles existent dans les matériaux monophasés en raison de l'anisotropie du comportement de chaque grain, et dans les matériaux multi phasés en raison des propriétés différentes des différentes phases. Les contraintes résiduelles de

type II résultent par exemple de décalages de déformation entre grains voisins et de décalages de déformation ou de température entre les phases d'un matériau multiphasé.

- **Les contraintes résiduelles de type III** représentent l'écart local des contraintes résiduelles au sein d'une cristallite individuelle par rapport à sa contrainte résiduelle moyenne (variation à l'échelle atomique). Elles existent au sein d'un grain, essentiellement en raison de la présence de dislocations et d'autres défauts cristallins. Ces contraintes sont causées, par exemple, par des vides, des atomes de soluté ou des dislocations dans le réseau cristallin.

Les contraintes résiduelles de type I sont les plus importantes d'un point de vue technique, tandis que les autres présentent un intérêt pour les études en science des matériaux.(2)

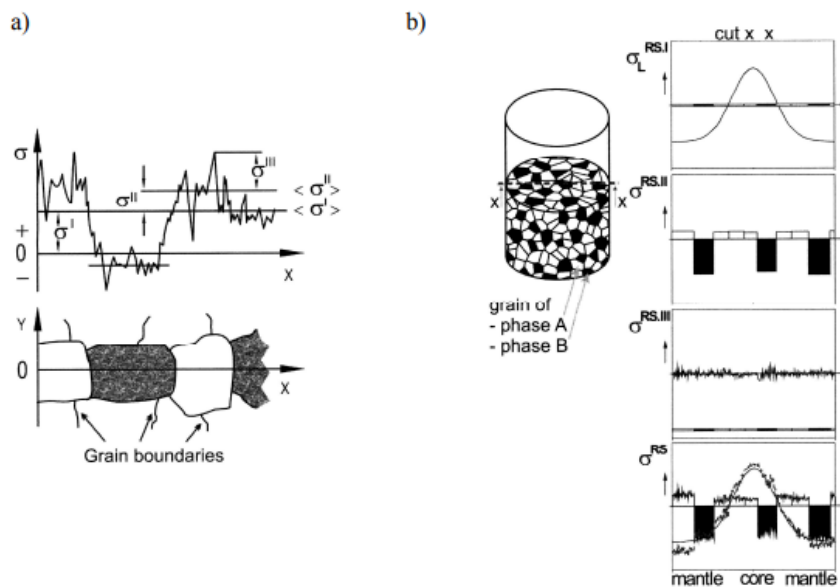


Figure 3. 1 : Types I, II et III de contraintes résiduelles dans les matériaux monophasés et multiphasés.

#### **IV. Relation entre les contraintes résiduelles et les propriétés mécaniques des joints FSW**

Le soudage par fusion génère des contraintes résiduelles de traction élevées, proches de la limite d'élasticité du matériau, ce qui réduit les propriétés mécaniques des assemblages soudés et augmente le risque de déformation plastique et de rupture sous charge. En revanche, le soudage par friction-malaxage (FSW) produit principalement des contraintes résiduelles de

compression dans la zone thermo mécaniquement affectée (TMAZ) et un faible niveau de contrainte résiduelle de traction dans la zone de malaxage (SZ). Cette répartition des contraintes améliore la résistance à la traction et à la fatigue des assemblages FSW, les rendant équivalents ou supérieurs au métal de base. La recristallisation dynamique dans la SZ contribue également à relâcher les contraintes résiduelles, retardant ainsi la rupture et améliorant globalement les performances mécaniques des assemblages FSW.

## V. Techniques de mesure de contraintes résiduelles

Il existe généralement deux grandes catégories de méthodes pour mesurer les contraintes résiduelles : les méthodes destructives et les méthodes non destructives.

Les méthodes destructives se subdivisent en techniques mécaniques et chimiques, tandis que les méthodes non destructives regroupent des approches telles que la diffraction, les ultrasons ou encore les techniques magnétiques.

### ➤ Méthodes de diffraction :

Les méthodes de diffraction pour la mesure des contraintes résiduelles sont considérées comme non destructives.

- Diffraction des rayons X (DRX) :

La diffraction des rayons X est une autre technique non destructive largement utilisée pour mesurer les contraintes résiduelles. Elle consiste à bombarder le matériau avec des rayons X qui pénètrent jusqu'à quelques microns sous la surface. Les rayons X sont alors diffractés par les grains cristallins du matériau, produisant une interférence constructive.

En mesurant l'angle de diffraction maximale, on peut déterminer les distances interplanaires selon la loi de Bragg. Si des contraintes résiduelles sont présentes, ces distances diffèrent de celles d'un matériau non sollicité.(3)

$$2d_{hkl} * \sin \theta_{hkl} = \lambda$$

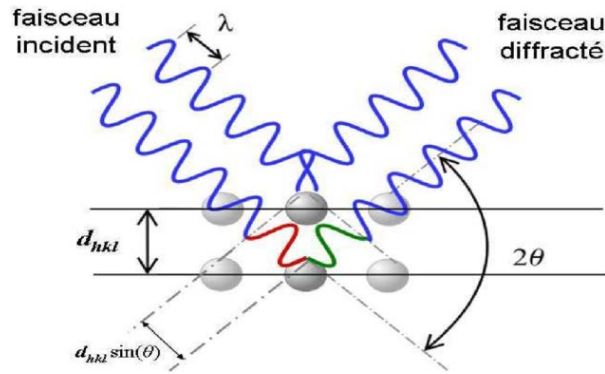


Figure 3. 2 : Diffraction des rayons X par un réseau cristallin.

Parmi les méthodes non destructives, la diffraction neutronique est l'une des premières techniques utilisées. Elle repose sur l'envoi d'un faisceau de neutrons sur le matériau à analyser. Le faisceau diffracté est ensuite capté, et grâce à la loi de Bragg, il est possible de détecter les variations du réseau cristallin causées par les contraintes internes. Pour obtenir les valeurs absolues de contrainte, la méthode nécessite un étalonnage avec un échantillon de même nature, mais sans contrainte.

- Diffraction synchrotron :

Les synchrotrons (rayons X durs) produisent des faisceaux très intenses de rayons X de haute énergie. Ces rayons X ont une pénétration en profondeur supérieure à celle des rayons X conventionnels. Cette profondeur de pénétration accrue permet à la diffraction synchrotron de fournir des cartes tridimensionnelles à haute résolution spatiale de la distribution des contraintes, jusqu'à des profondeurs millimétriques, dans les composants techniques. Cette profondeur de pénétration plus élevée est considérée comme l'un des principaux avantages de la diffraction synchrotron par rapport à la diffraction des rayons X conventionnelle.

➤ **Autres méthodes :**

- Analyse photoélastique :

L'analyse photoélastique est une méthode qualitative et destructive. Elle implique l'application d'un revêtement plastique sensible à la déformation sur la pièce à analyser, suivi d'un éclairage à lumière polarisée via un polariscope en réflexion. L'observation à travers cet appareil révèle les zones de déformation sous forme de franges colorées, permettant d'identifier visuellement les zones de concentration de contraintes.

- Analyse du bruit de Barkhausen :

Enfin, l'analyse du bruit de Barkhausen est une technique non destructive qui s'applique aux matériaux ferromagnétiques. Un champ magnétique est utilisé pour générer un signal discontinu (semblable à un bruit), en lien avec les contraintes internes. Bien que cette méthode nécessite un étalonnage rigoureux et ne soit applicable qu'aux matériaux ferromagnétiques, elle est rapide, efficace et particulièrement adaptée à la détection de contraintes dans les pièces en acier ou en fer.

- Perçage de trous :

Le perçage de trous est une méthode destructive permettant d'évaluer les contraintes macroscopiques proches de la surface d'un matériau. Elle consiste à percer un petit trou dans la pièce, ce qui perturbe l'équilibre des contraintes internes. La déformation résultante autour du trou, liée au volume de matière retiré, peut ensuite être mesurée soit à l'aide de jauges de contrainte, soit par méthodes optiques.

## **VI. État de l'art sur les effets de contraintes résiduelles induites par FSW**

- \* **Effets des contraintes résiduelles sur la propagation des fissures courtes dans un alliage d'aluminium 7075-T6 soudé par friction-malaxage sous chargement biaxial**

L'effet des contraintes résiduelles longitudinales et transversales sur la propagation des fissures courtes dans les joints soudés par friction-malaxage (FSW) d'un alliage d'aluminium 7075-T6 a été examiné par Zhang et al. [5]. La figure 3.3 (b) illustre les profils de contraintes résiduelles mesurées selon deux directions : longitudinale (LD) et transversale (TD). On y observe une distribution en double pic pour les contraintes longitudinales avec des maxima atteignant 43,6 MPa et -50,2 MPa selon les zones. Les contraintes transversales présentent quant à elles une forme en V, culminant à 20,7 MPa en traction et -40 MPa en compression au centre du cordon de soudure.[16]

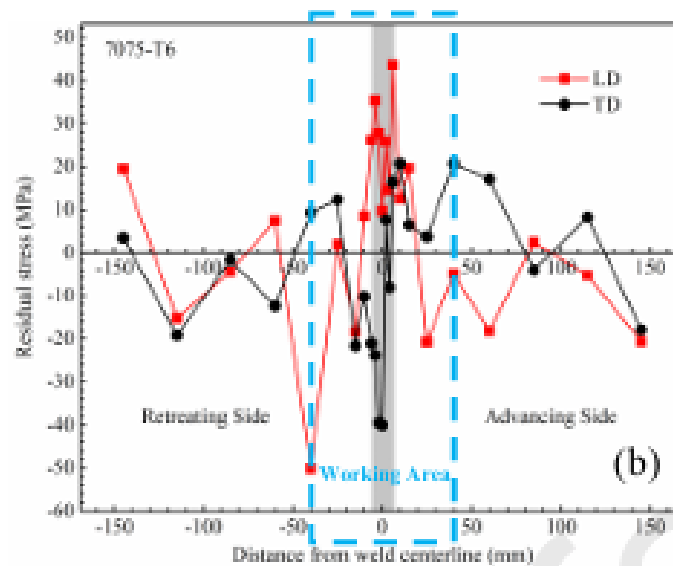
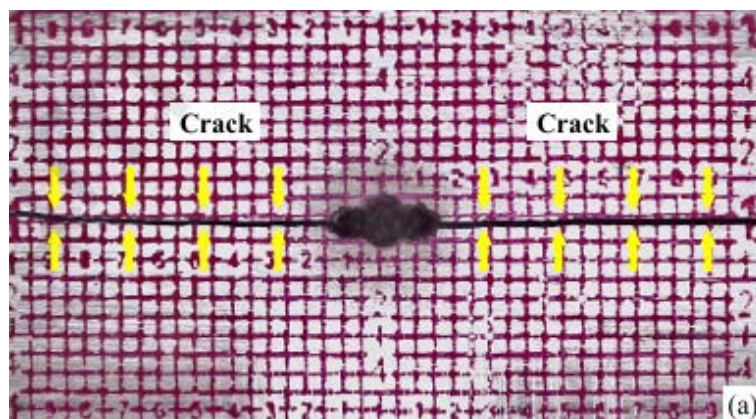


Figure 3.3 : (b) profil des contraintes résiduelles (LD et TD signifient respectivement contrainte résiduelle longitudinale et contrainte résiduelle transversale).

Les essais de propagation des fissures de fatigue ont été réalisés sur des éprouvettes cruciformes, avec des fissures orientées soit perpendiculairement, soit parallèlement au joint soudé. La figure 3.4 présente les chemins de fissuration obtenus expérimentalement : droits pour les fissures perpendiculaires (figures 3.4a et 3.4b) et en forme de S pour celles parallèles au joint (figure 3.4c). Cette différence est attribuée à la combinaison entre les contraintes résiduelles et les charges biaxiales appliquées, comme illustré par la figure 3.5.



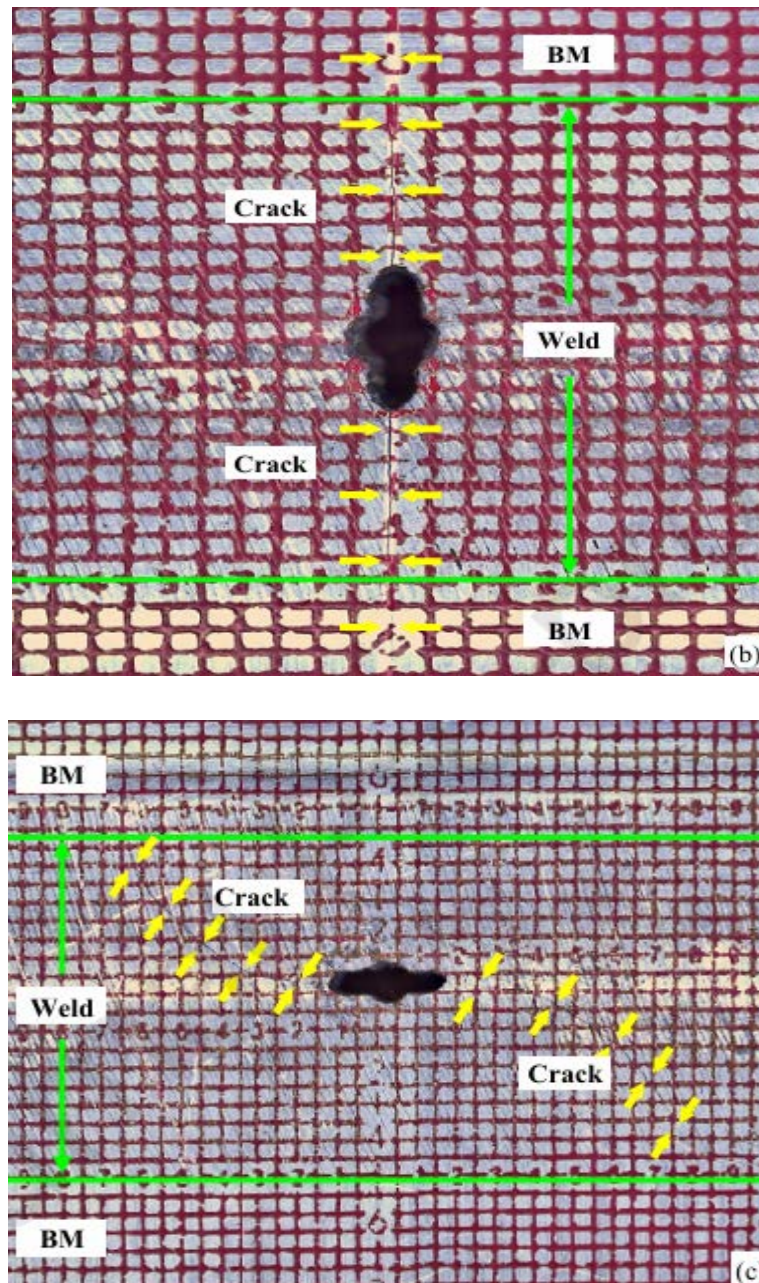


Figure 3. 4 : Trajectoire expérimentale de fissure sous  $\lambda=1,5$  (a) BM (b) FSW (fissure perpendiculaire à la soudure) (c) FSW (fissure parallèle à la soudure).

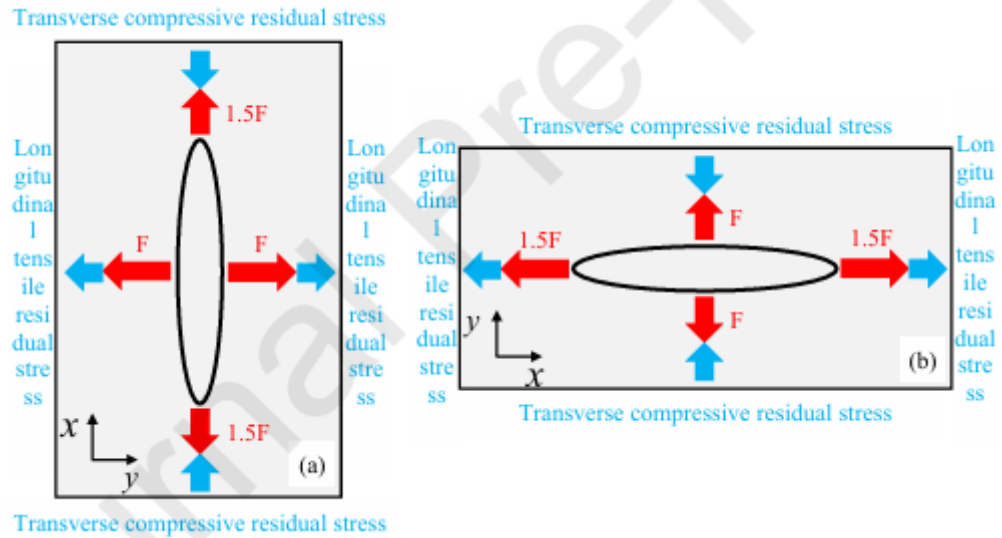
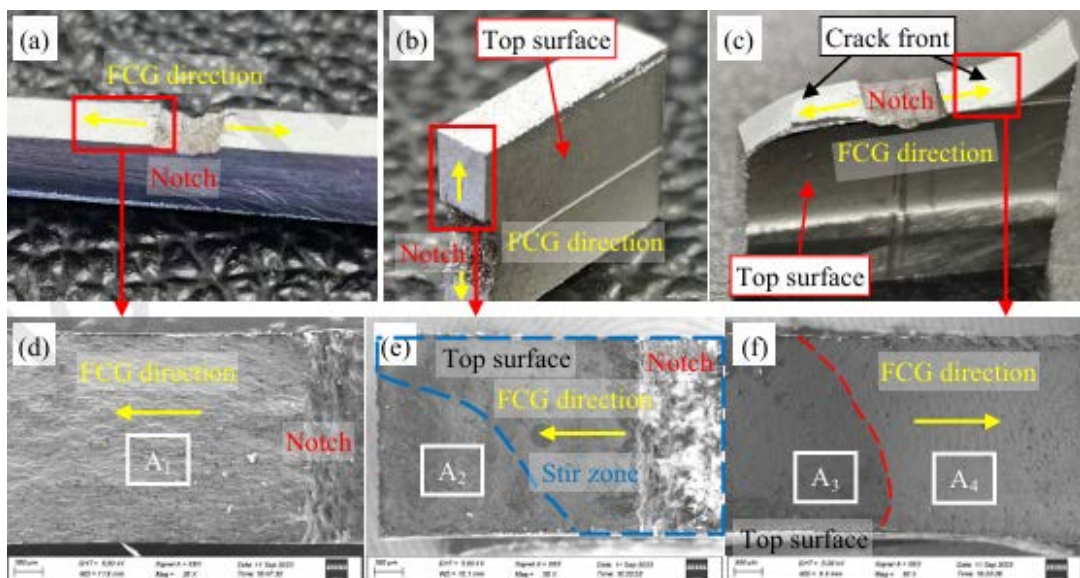


Figure 3.5 : combinaison des composantes de contrainte résiduelle et des contraintes biaxiales dans l'échantillon cruciforme FSWed avec (a) fissure perpendiculaire à la soudure (b) fissure parallèle à la soudure

Les surfaces de rupture obtenues par fractographie sont représentées à la figure 3.6. Les échantillons avec fissures parallèles au cordon révèlent une surface de rupture torsadée, caractérisée par un front de fissure courbé, dû à la distribution non uniforme des contraintes résiduelles à travers l'épaisseur. Cette observation est confirmée par les vues à fort grossissement (figures 3.6i et 3.6j), où l'on remarque des stries de fatigue inclinées et une fissuration transgranulaire typique.



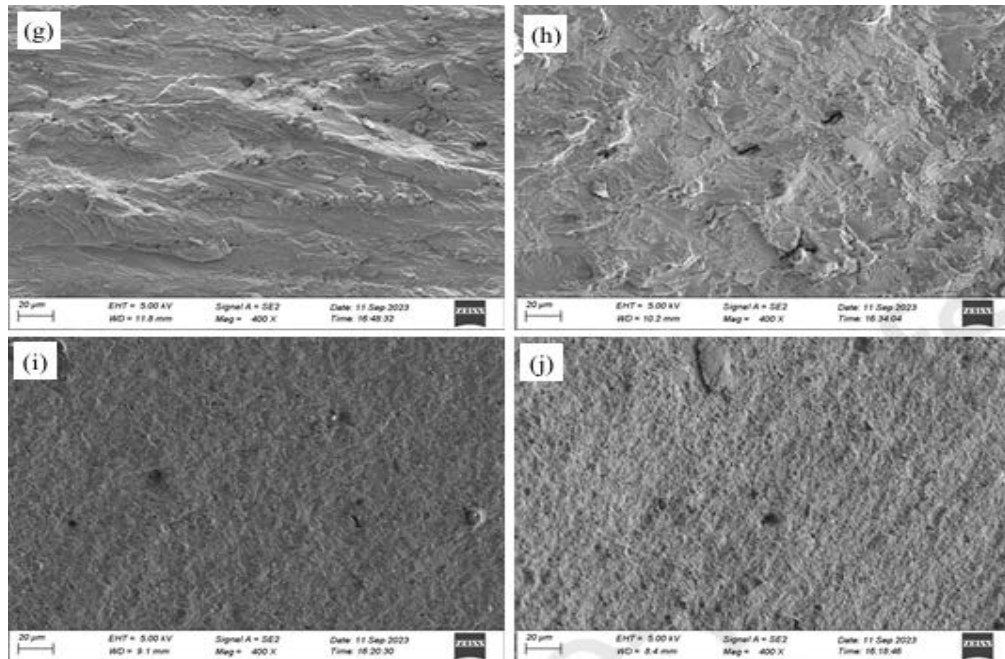


Figure 3. 6 : Surface de macrofracture d'échantillons cruciformes soumis à une charge biaxiale dans le plan ( $\lambda=1,5$ ).

**\* Les contraintes résiduelles et cycles thermiques dans le soudage par friction-malaxage (FSW) de l'alliage d'aluminium AA7075-T651**

Buglioni et al. [1] ont analysé les cycles thermiques et les contraintes résiduelles induits par le procédé de soudage par friction-malaxage (FSW) sur des plaques d'alliage d'aluminium AA7075-T651.

Les résultats obtenus montrent que les contraintes résiduelles longitudinales présentent une distribution de type "M", avec des valeurs de traction atteignant jusqu'à 93 MPa du côté de l'avance (AS), et des zones de compression atteignant -21 MPa à mesure que l'on s'éloigne du cordon de soudure (figure 3.7). Le point de contrainte nulle (NSP), défini comme la position transversale où la contrainte longitudinale est nulle, varie en fonction de la vitesse d'avance, se situant entre 8,3 mm et 22 mm du centre de la soudure (figure 3.8). [17]

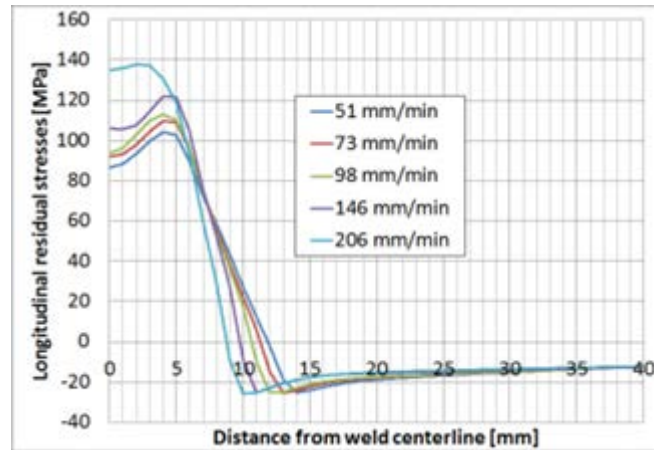


Figure 3. 7 : Contraintes résiduelles longitudinales obtenues par simulation numérique.

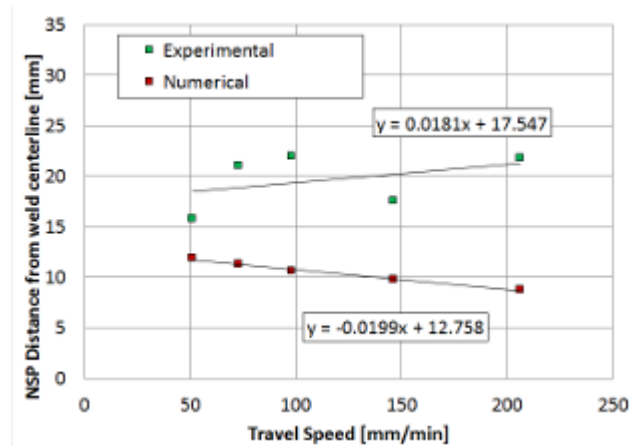


Figure 3. 8 : Évolution du point de contrainte nulle (NSP) en fonction de la vitesse d'avance.

**\* Influence des contraintes résiduelles sur les joints soudés FSW en alliage AA6082**

Dias et al. [1] ont étudié les contraintes résiduelles générées dans un joint soudé bout à bout par friction-malaxage (FSW) dans un alliage d'aluminium AA6082-T6. Pour cela, un procédé de soudage FSW a été appliqué à des plaques de 6 mm d'épaisseur, et les contraintes résiduelles ont été mesurées à l'aide de la technique du trou perforé.

La distribution des contraintes résiduelles montre une transition nette des contraintes de compression dans la zone NZ (atteignant environ -60 MPa) vers des contraintes de traction dans les zones adjacentes. Ces variations s'expliquent par les gradients thermiques et mécaniques engendrés durant le processus de soudage.

Cette étude met en évidence le rôle significatif des contraintes résiduelles sur l'état mécanique final des joints FSW en aluminium, en particulier sur leur potentiel de fissuration et de fatigue sous sollicitation mécanique. [18]

\* **Influence des contraintes résiduelles, de la microstructure et de l'aspect thermique dans le soudage par friction-malaxage de l'aluminium AA1050**

El Mouhri et al. [9] ont étudié l'effet combiné des paramètres de soudage par friction-malaxage (FSW) sur les contraintes résiduelles, les microstructures et le comportement thermique de l'alliage d'aluminium AA1050. Deux échantillons ont été soudés avec des rapports de malaxage différents, calculés selon la formule  $SR = \omega \cdot d_{pin} / V$ , où  $\omega$  est la vitesse de rotation,  $d_{pin}$  le diamètre de la broche, et  $V$  la vitesse d'avance.

Les contraintes résiduelles ont été mesurées par diffraction des rayons X (XRD) sur les côtés progressifs et en retrait de la soudure. Les résultats montrent que les contraintes résiduelles longitudinales sont plus élevées que les contraintes transversales. Les figures 3.9 et 3.10 illustrent respectivement les contraintes mesurées pour les échantillons #1 ( $SR = 60$ ) et # 2 ( $SR = 53.25$ ). Les contraintes maximales ont été observées dans les zones thermo-mécaniquement affectées (TMAZ), tandis que la ligne centrale de la soudure présente des contraintes plus faibles, probablement en raison de la recristallisation dynamique induite par la déformation plastique intense.[19]

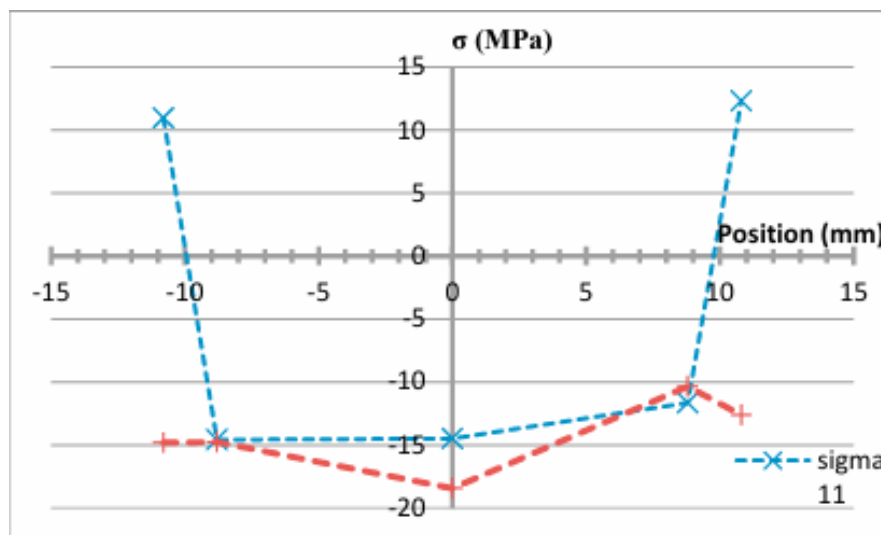


Figure 3. 9 : Contraintes résiduelles mesurées pour l'échantillon #1.

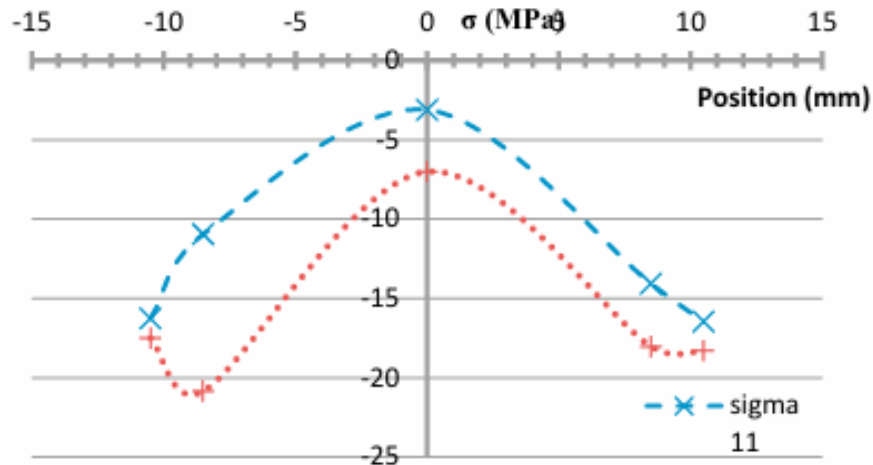


Figure 3. 10 : Contraintes résiduelles mesurées pour l'échantillon #2.

**\* Optimisation de la distance des chauffages en tension thermique transitoire pour réduire les contraintes résiduelles et la propagation des fissures de fatigue dans les assemblages FSW de l'alliage AA2024-T3**

Pujono et al. [1] ont étudié la minimisation des contraintes résiduelles et de la propagation des fissures de fatigue dans les assemblages soudés par friction-malaxage (FSW) de l'alliage d'aluminium AA2024-T3, en utilisant une technique de tension thermique transitoire (TTT). Des chauffages symétriques à 200 °C ont été appliqués à des distances de 25 mm, 40 mm et 55 mm de la ligne de soudure lors du FSW, réalisé à une vitesse de rotation de 1500 tr/min et une vitesse d'avance de 30 mm/min. Les contraintes résiduelles ont été mesurées par diffraction neutronique, tandis que les propriétés mécaniques et microstructurales ont été analysées via des essais de traction, des mesures de microdureté Vickers et des observations MET.

La distribution des contraintes résiduelles longitudinales (fig. 3.11) révèle une transition marquée : pour une distance de chauffage de 25 mm, des contraintes de compression (-50 MPa) sont générées dans la zone de moelle (NZ), équilibrées par des contraintes de traction localisées près des chauffages. En revanche, sans TTT, la NZ présente un pic de traction résiduelle (+120 MPa). Cette réduction est attribuée à l'effet combiné du gradient thermique contrôlé par les chauffages et de la recristallisation dynamique, entraînant une redistribution des contraintes.

Les essais de propagation des fissures de fatigue (fig. 3.12) montrent que le taux de propagation ( $da/dN$ ) est le plus faible pour une distance de chauffage de 25 mm, avec un nombre de cycles à rupture doublé comparé au soudage conventionnel. Les auteurs lient cette amélioration aux contraintes de compression résiduelles dans la NZ, qui réduisent le facteur d'intensité de contrainte effectif

### Chapitre III Effets des contraintes résiduelles dues au soudage par FSW sur la propagation des fissures de fatigue

( $\Delta K_{eff}$ ), et à la précipitation de phases  $\theta'$  ( $Al_2Cu$ ) durant le refroidissement, renforçant la microstructure. [20]

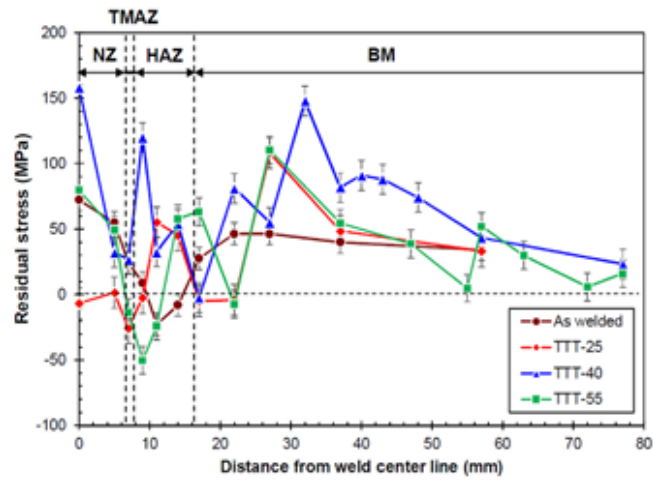


Figure 3. 11 : Contraintes résiduelles longitudinales.

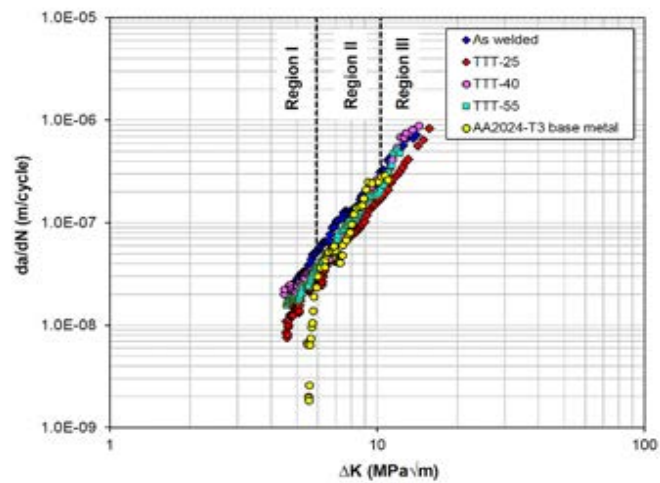


Figure 3. 12 : Courbes  $da/dN$  en fonction de  $\Delta K$ .

# **Chapitre IV**

Analyse des effets des contraintes  
résiduelles sur la propagation des fissures de  
fatigue

## I. Méthodologie de Prédiction et Données Expérimentales :

### I.1 Introduction :

Ce chapitre présente la méthodologie de prédiction de la fissuration par fatigue en prenant en compte les paramètres de chargement, les caractéristiques du matériau, la géométrie de la pièce ainsi que les contraintes résiduelles, dans le cadre de l'environnement du code AFGROW.

### I.2 Définition de l'éprouvette SENT

L'éprouvette SENT est une éprouvette en traction uniaxiale comportant une entaille sur un seul côté (Single Edge Notch), ce qui permet l'amorçage et la propagation contrôlée d'une fissure sous chargement en tension.

#### ❖ Dimensions typiques et géométrie :

Les dimensions ne sont pas universelles, mais suivent souvent des recommandations :

Paramètres typiques :

- Largeur ( $W$ ) : 125 mm
- Épaisseur ( $T$ ) : 8 mm
- Longueur totale : 120 mm
- Longueur de la fissure initiale ( $a$ ) : 5 mm

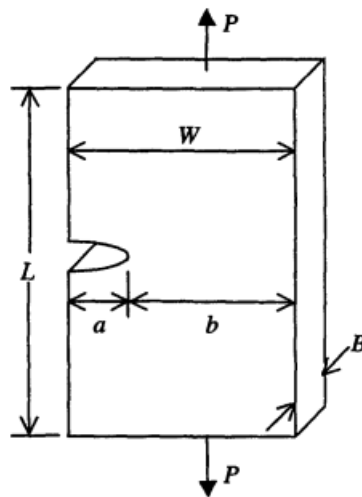


Figure 4. 1 : Éprouvette en tension fissurée sur le côté (SENT). [21]

## II. Description du modèle de prédiction Nasgro

L'équation NASGRO est modifiée par l'introduction du concept de facteur d'intensité de contrainte seuil effectif intrinsèque  $\Delta K_{eff}$ . L'un des avantages de la méthode proposée est qu'elle permet d'éviter l'analyse complexe du comportement de croissance des petites fissures, et de calculer la durée de vie en fatigue en intégrant directement le modèle de croissance des fissures, de la taille initiale du défaut à la taille critique. La limite de fatigue et le facteur d'intensité de contrainte seuil effectif intrinsèque  $\Delta K_{eff}$  sont utilisés pour calculer la taille initiale du défaut. La valeur de  $\Delta K_{eff}$  est déterminée par extrapolation des courbes de vitesse de propagation des fissures. [22]

✓ L'équation NASGRO :

$$\frac{da}{dN} = C \left[ \left( \frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \frac{\left( 1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left( 1 - \frac{K_{max}}{K_c} \right)^q}$$

Où  $f = \Delta K_{eff} / \Delta K$  représente la contribution à la fermeture des fissures, C, n, p et q sont des paramètres de matériau dérivés expérimentalement,  $\Delta K_{th}$  est la plage de facteurs d'intensité de contrainte seuil (une fonction de R) et  $K_c$  est le facteur d'intensité de contrainte critique.

Pour une charge constante, f est exprimé comme :

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

Où :

$$* A_0 = (0.825 - 0.34\alpha + 0.05\alpha^2) \cdot \left[ \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{S_{max}}{\sigma_0}\right) \right]^\alpha$$

$$* A_1 = (0.415 - 0.071\alpha) \cdot \frac{S_{max}}{\sigma_0}$$

$$* A_2 = 1 - A_0 - A_1 - A_3$$

$$* A_3 = 2A_0 + A_1 - 1$$

### III. Matériau d'étude

L'alliage d'aluminium étudié dans ce travail est le 2024-T3 TL. Ses caractéristiques mécaniques sont présentées dans le tableau 4.1 ci-dessous :

Tableau 4.1 : Caractéristiques mécaniques de l'alliage d'aluminium 2024-T3 en direction longitudinale (TL).

E (GPa)	$\sigma_y$ (MPa)	U <sub>ts</sub> (MPa)	K <sub>ic</sub> (MPa.sqrt(m))	K <sub>c</sub> (MPa.sqrt(m))	$\nu$
73.1	345	483	34	40	0.33

Les paramètres utilisés dans le modèle de propagation intégré au logiciel Nasgro sont répertoriés dans le tableau (4.2) :

Tableau 4.2 : Paramètres utilisés dans le modèle de propagation des fissures Nasgro.

C	M	P	Q	$\Delta k_{th} \text{ à } r=0$
$3.3 \times 10^{-10}$	3	0.25	0.25	3.5

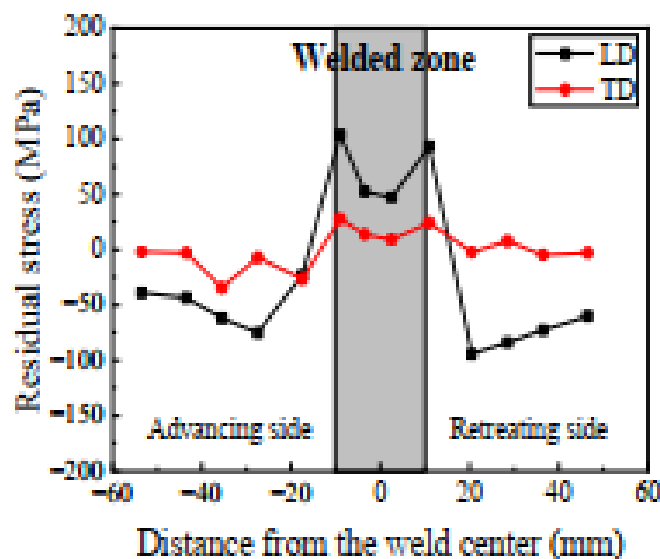


Figure 4. 2 : Distribution des contraintes résiduelles.

## IV. Effet du rapport de charge

### IV.1 Eprouvette non soudée SCR (sans contraintes résiduelles)

L'effet du rapport de charge  $R$  ( $R=0.1$ ,  $R=0.2$ ,  $R=0.33$ ,  $R=0.5$ ) sur la durée de vie et la vitesse de fissuration pour l'éprouvette non soudée SCR, sous une contrainte maximale constante 80 MPa sont montrées par les figures 4.2 et 4.3.

La figure 4.2 représente l'évolution de la longueur de fissure «  $a$  » en fonction du nombre de cycles  $N$ . On remarque que plus le rapport de charge  $R$  est faible, plus la fissure n'évolue rapidement. En effet, les courbes pour  $R=0.1$  et  $R=0.2$  atteignent rapidement une longueur de fissure autour de 45 mm en moins de 80000 cycles, par contre pour  $R=0.5$ , la propagation plus lente, et la fissure n'atteint cette longueur qu'après environ 180000 cycles (177415 cycles). La figure 4.3 illustre la vitesse d'évolution des fissurations en fonction de la longueur de fissure  $a$ , on remarque que la vitesse de propagation de fissure augmente avec la longueur de la fissure, et plus le rapport de charge diminue, plus la vitesse augmente. Dans la longueur de fissure  $a=35$  mm on observe que la vitesse de fissuration pour  $R=0.1$  est supérieur par rapport  $R=0.5$ .

D'après la figure 4.4, qui présente l'évolution de la vitesse de propagation des fissures ( $da/dN$ ) en fonction du facteur d'intensité de contrainte ( $\Delta K$ ) selon une échelle logarithmique, on observe une croissance exponentielle de  $da/dN$  avec l'augmentation de  $\Delta K$ , quel que soit le rapport de charge. Par exemple pour  $\Delta k=27$  (MPa.  $\sqrt{m}$ ), la vitesse de fissuration pour  $R=0.5$  est plus élevée par rapport  $R=0.1$ , et pour  $R=0.2$  et  $R=0.33$  y a pas de grande différence. Cela est cohérent avec les effets de fermeture de fissure : à faible  $R$ , la fissure peut se reformer partiellement pendant le cycle, ce qui diminue l'effet de la contrainte effective.

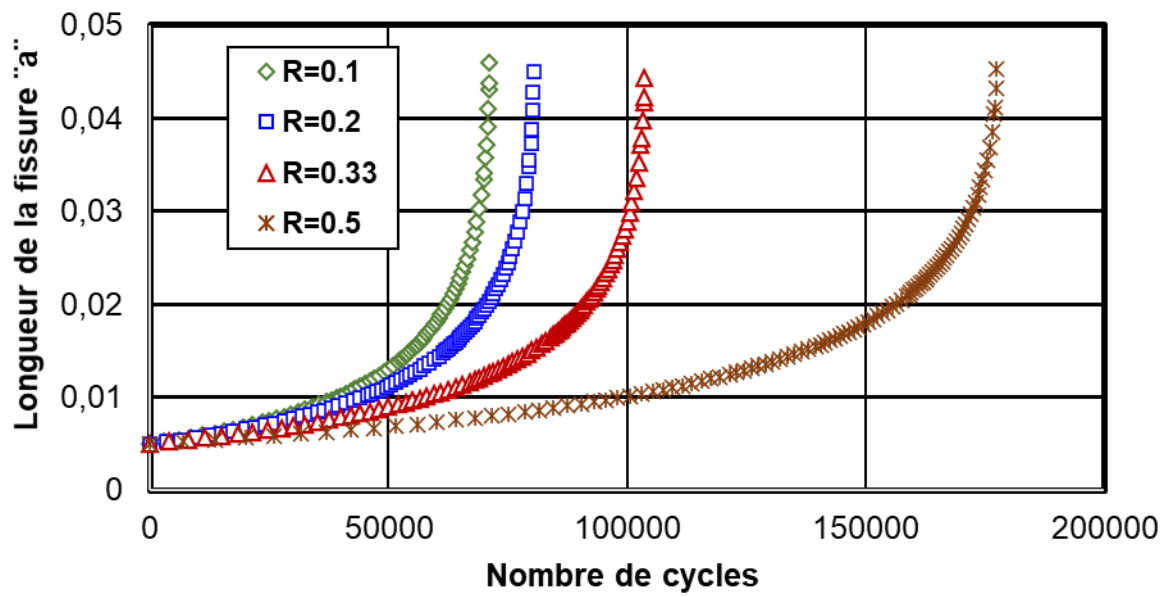


Figure 4. 3 : Effet du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue.

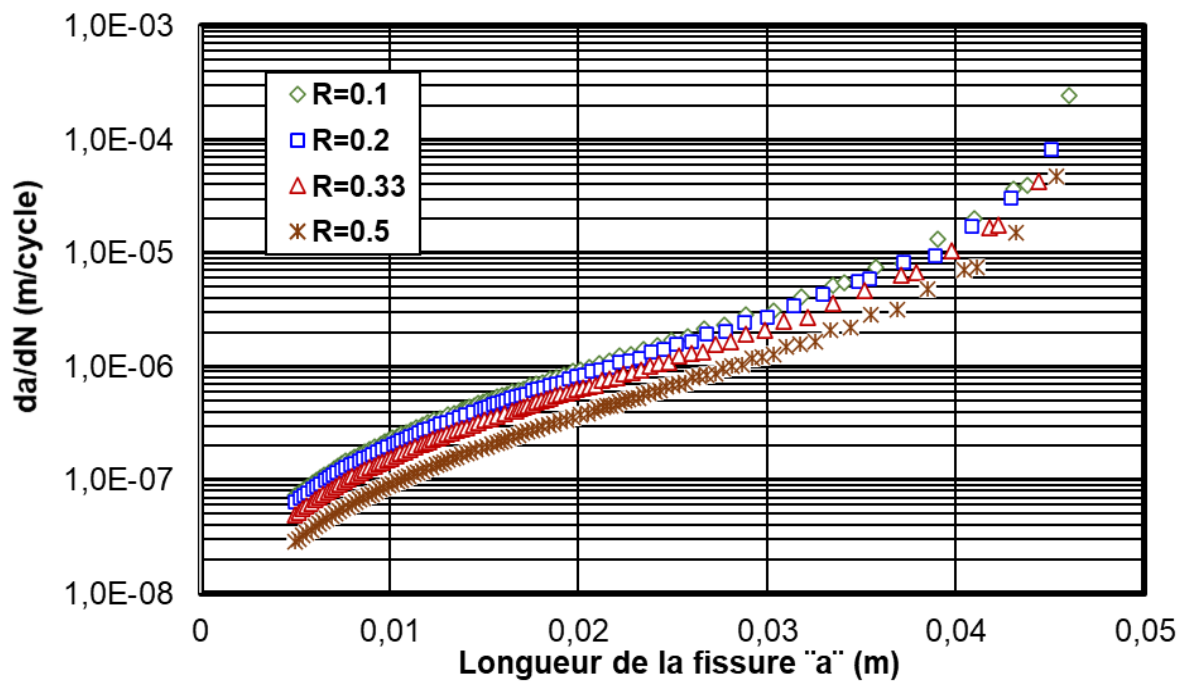


Figure 4. 4 : Effet du rapport de charge sur la vitesse de fissuration.

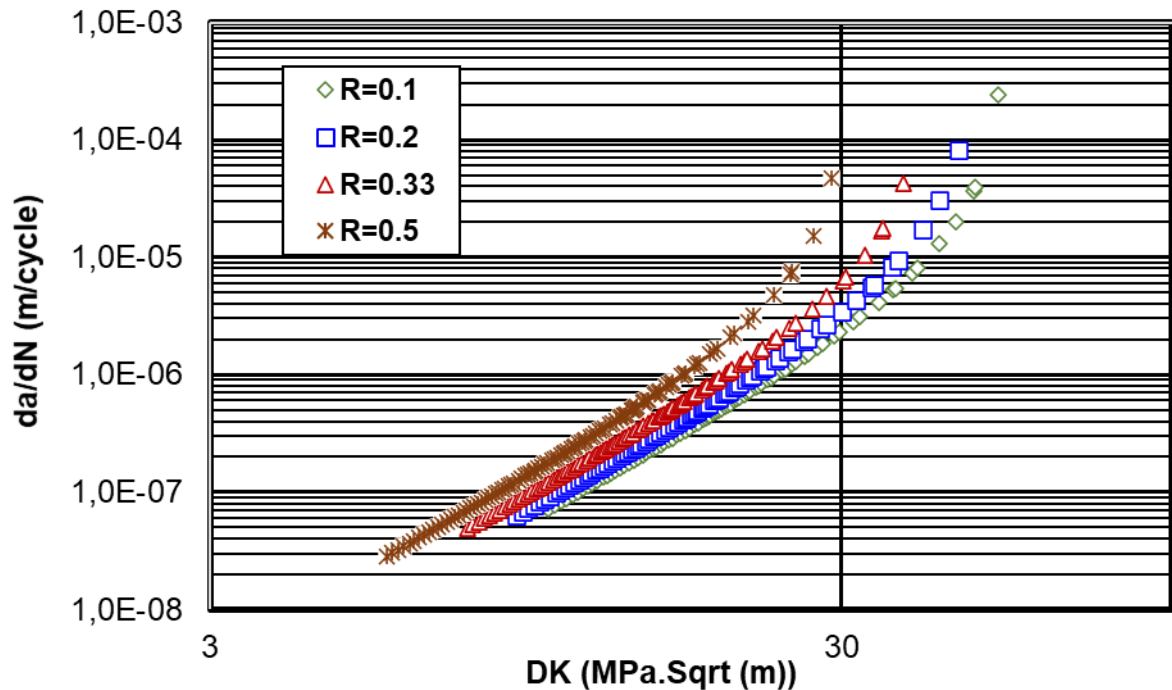


Figure 4. 5 : Effet du rapport de charge R sur la vitesse de propagation de fissure en fonction de l'intensité de contrainte  $\Delta K$ .

#### IV.2 Effet du rapport de charge en présence des contraintes résiduelles

Cette partie représente le comportement en fissuration par fatigue pour différents rapports de charge R (0.1, 0.2, 0.33, 0.5) en présence des contraintes résiduelles dues par friction malaxage (FSW). La figure 4.5 montre l'évolution de la longueur de fissure « a » par rapport au nombre de cycles N. Pour les faibles rapports de charge (R=0.1, R=0.2, R=0.33) on remarque que l'augmentation de la longueur de fissure c'est la même jusqu'à nombre de cycles spécifique environ (625500 cycles), et pour R=0.5 elle est inférieure jusqu'à ce que la longueur de fissure atteint a=0.33 m avec l'augmentation du nombre de cycles (695000 cycles). Pour R variant de 0.1 à 0.33, le rapport de charge n'a aucun effet et les contraintes résiduelles de tension sont dominantes et durant la variation en remarque la présence des courbures montrant l'effet de ces contraintes. Par contre pour R=0.5, la propagation dépend du rapport R et des contraintes résiduelles c.à.d du facteur d'intensité de contraintes  $K_r$  et du rapport de charge effective  $R_{eff}$

L'évolution de la vitesse de propagation de fissure  $da/dN$  (m/cycle) présenté par la figure 4.6 en fonction de la longueur de fissure « a », et en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte  $\Delta K$  (MPa.Sqrt(m)) par la figure 4.7, pour différents rapports de charge R. On observe une tendance générale d'augmentation du taux de propagation avec

l'allongement de la fissure (figure 4.6), on note une diminution de la vitesse ( $5.67 \times 10^{-8}$  jusqu'à  $2.21 \times 10^{-8}$  m/cycle) entre  $a=15$  mm et  $a=22$  mm, après la vitesse continue d'augmenter jusqu'à atteindre une longueur de 40 mm. D'après la figure 4.7, l'augmentation pour tous les rapports jusqu'à  $\Delta k = 1.8 \times 10^{+1}$  MPa. $\sqrt{m}$ , pour  $R=0.1$  la vitesse est supérieur que les autres rapports avec  $da/dN = 1.85 \times 10^{-5}$ . On conclue que l'augmentation du R a accéléré la propagation de la fissure.

La figure 4.8 présente l'évolution de  $K_r$  en fonction de la longueur de fissure « a ». Dans la zone initiale de propagation, correspondant à une longueur de fissure entre 5 mm et 2 mm on observe une diminution du  $K_r$  passant de près de -5 à environ -20. Au-delà de  $a=23$  mm, une augmentation progressive jusqu'à  $a=28$  mm après une stabilisation jusqu'à  $a=32$  mm avec  $K_r = -16.12$  et continue d'augmenter. On note, par exemple pour une fissure de longueur proche de 42 mm,  $K_r$  dépasse 0 pour tous les rapports de charge, atteignant même des valeurs proches de 5 MPa. $\sqrt{m}$  pour  $R=0.1$ .

La variation du rapport du charge effective  $R_{eff}$  en fonction de la longueur de fissure « a » présenté dans la figure 4.9, pour différents rapports de charge R. On observe tout d'abord que pour les faibles longueurs de fissure (entre 5 et 27 m), les valeurs de  $R_{eff}$  restent stables et négatives  $R_{eff} = -0.3$  pour ( $R=0.1$ ,  $R=0.2$  et  $R=0.33$ ). Par contre pour  $R=0.5$ , on remarque une diminution et  $R_{eff}$  reste positive jusqu'à  $a=12$  mm. A partir d'une longueur d'environ 30 mm, une tendance à l'augmentation de  $R_{eff}$  pour tous les rapports. Pour  $R=0.5$  la courbe croit rapidement par rapport les autres rapports de charge qui augmentent plus modérée, les valeurs de  $R_{eff}$  atteignent environ 0.15 et 0.2 pour  $R=0.1$  et  $R=0.33$ , et autour de 0.03 pour  $R=0.2$ .

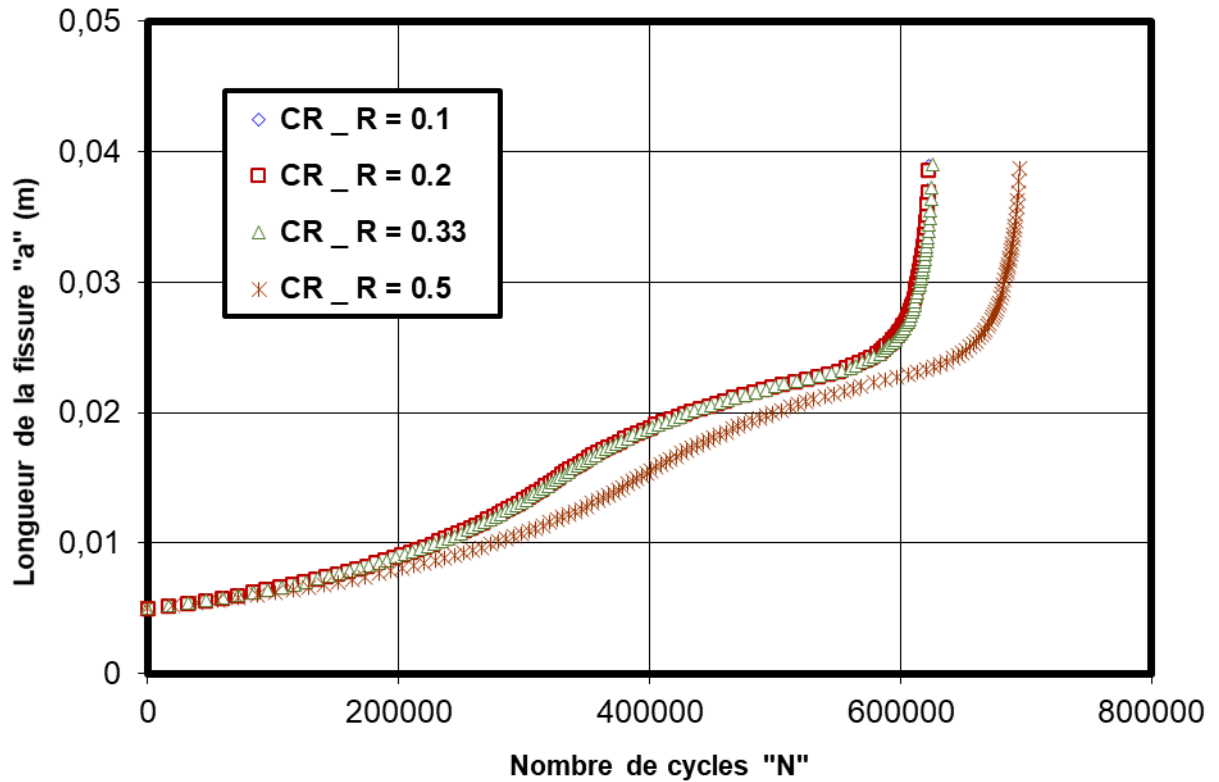


Figure 4. 6 : Evolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycles pour différents rapports de charge CR\_R.

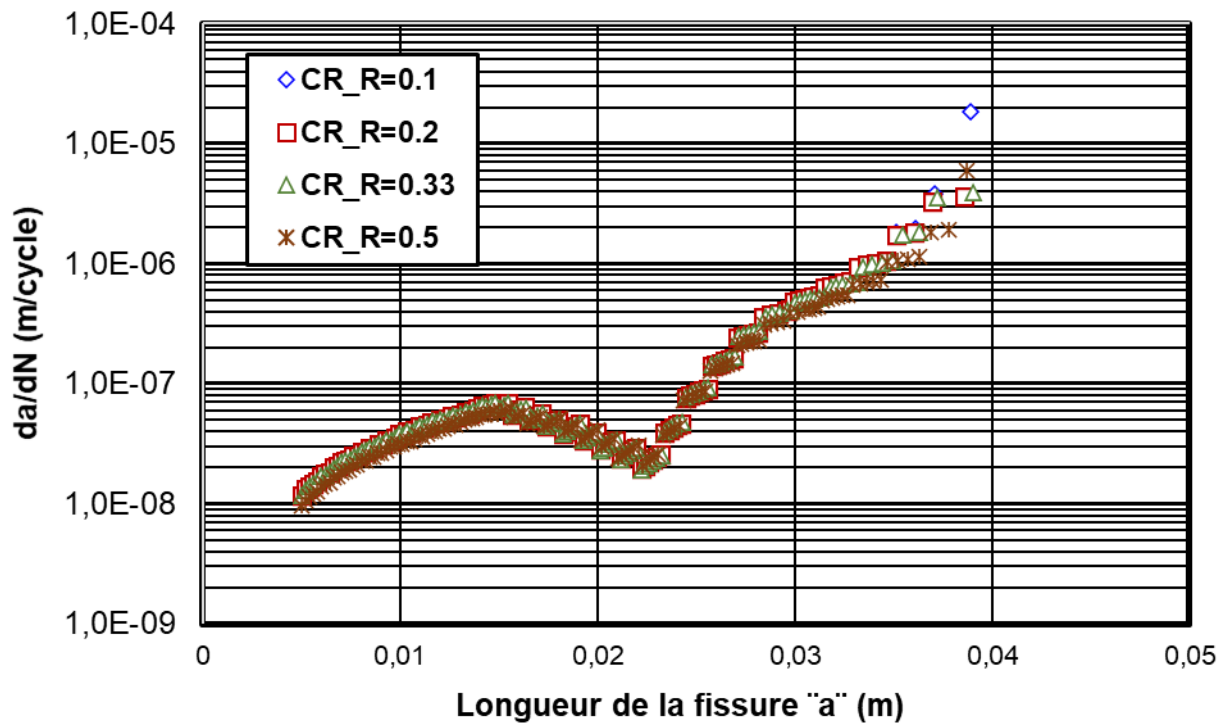


Figure 4. 7 : Effet du rapport de charge sur la vitesse de fissuration en fonction de la longueur de fissure a.

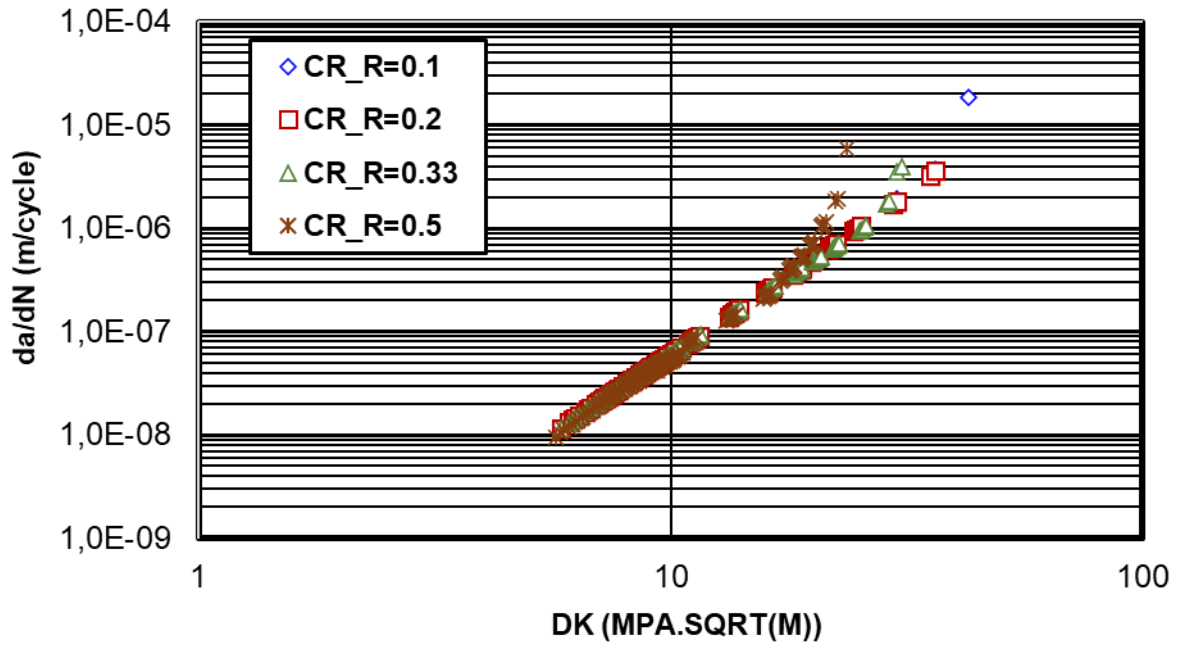


Figure 4. 8 : Effet du rapport de charge sur la vitesse de fissuration en fonction du facteur de l'intensité de contrainte.

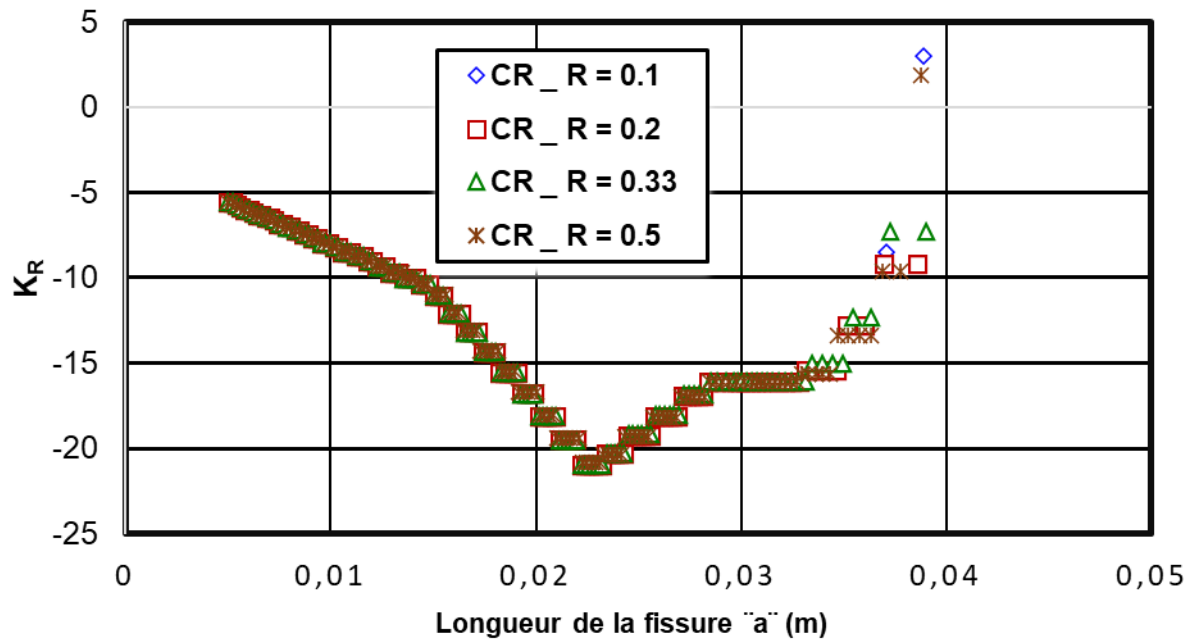


Figure 4. 9 : Evolution du  $K_R$  avec la longueur de la fissure.

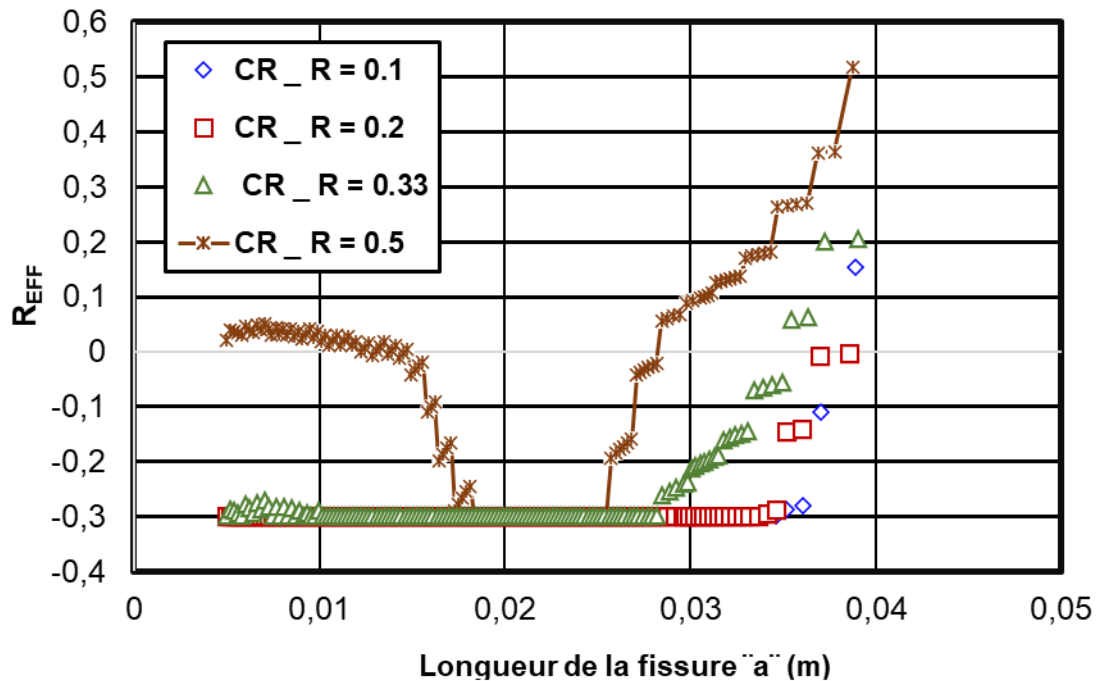


Figure 4. 10 : Variation du rapport de la charge effective avec la longueur de la fissure.

## V. Effet de l'amplitude de chargement

La figure 4.10 illustre l'évolution de la longueur de fissure « a » en fonction du nombre de cycles N sous différents niveaux de contraintes maximales ( $\sigma_{\max}$ ). Les amplitudes de chargements appliqués sont respectivement de 46.9, 53.6, 67, 80.4 MPa pour des chargements maximales de 70, 80, 100 et 120 MPa. On note une augmentation de la durée de vie par la diminution de l'amplitude de chargement. De plus on note un retard du au contrainte résiduelle pour  $\sigma_{\max} = 70$  MPa. Les vitesses de fissurations  $da/dN$  diminuent avec la diminution de l'amplitude de chargement de 80.4 à 46.9 MPa pour un rapport de charge  $R=0.33$ . En réalité, la diminution de la vitesse est aussi associée à la diminution du rapport de charge  $R_{eff}$  (figure 4.12) pour toutes les amplitudes de chargements et atteint une valeur minimale de -0.3 pour une longueur de fissure variant de 18 mm à 32 mm, le rapport de charge effective est lié au chargement appliqué et aux contraintes résiduelles dues au soudage par FSW à travers l'évaluation du facteur  $K_r$ . Le rapport de charge est déterminé par l'expression suivant  $R_{eff} = \frac{K_{\min} + K_r}{K_{\max} + K_r}$ .

Pour une contrainte maximale de 70 MPa, la fissure évolue lentement jusqu'à environ 200 000 cycles avant d'atteindre une longueur critique avoisinant 40 mm. À 80 MPa, la fissure atteint cette même longueur critique beaucoup plus rapidement, autour de 600 000 cycles.

Nous observons une augmentation significative de ce comportement à 100 MPa, où la durée de vie est limitée à environ 250 000 cycles, et encore plus à 120 MPa, avec une rupture observée à partir de 150 000 cycles avec une longueur de fissure plus ou moins que les autres  $a=0.31$ . Cette évolution confirme le caractère exponentiel de la propagation des fissures en fatigue sous l'effet des contraintes croissantes. On note également que pour les faibles niveaux de contrainte, la phase d'initiation est plus longue, tandis que pour les niveaux élevés ( $\geq 100$  MPa), la propagation devient quasi-immédiate.

La variation de la vitesse de propagation de la fissure  $da/dN$  en fonction de la longueur de fissure est donnée par la figure 4.11. Les courbes montrent que plus la contrainte maximale est élevée, plus la vitesse de propagation est importante pour une même longueur de fissure. À  $\sigma_{\max} = 120$  MPa la fissure évolue plus rapidement, avec un taux de propagation atteignant  $10^{-5}$  m/cycle autour de  $a=35$  mm. Par contre, pour  $\sigma_{\max} = 70$  MPa, la vitesse reste inférieure à  $10^{-7}$  m/cycle jusqu'à  $a=25$  mm. On observe également une inflexion dans les courbes entre  $a=20$  mm et  $a=30$  mm, où la vitesse augmente plus rapidement, ce qui traduit une transition vers un régime de propagation instable. Cela montre que la propagation dépend fortement de la longueur de la fissure et de la contrainte appliquée.

La variation du facteur  $K_r$  en fonction de la longueur de la fissure est donnée par la figure 4.13. La valeur minimale de  $K_r$  est à la longueur de fissure  $a= 23$  mm.

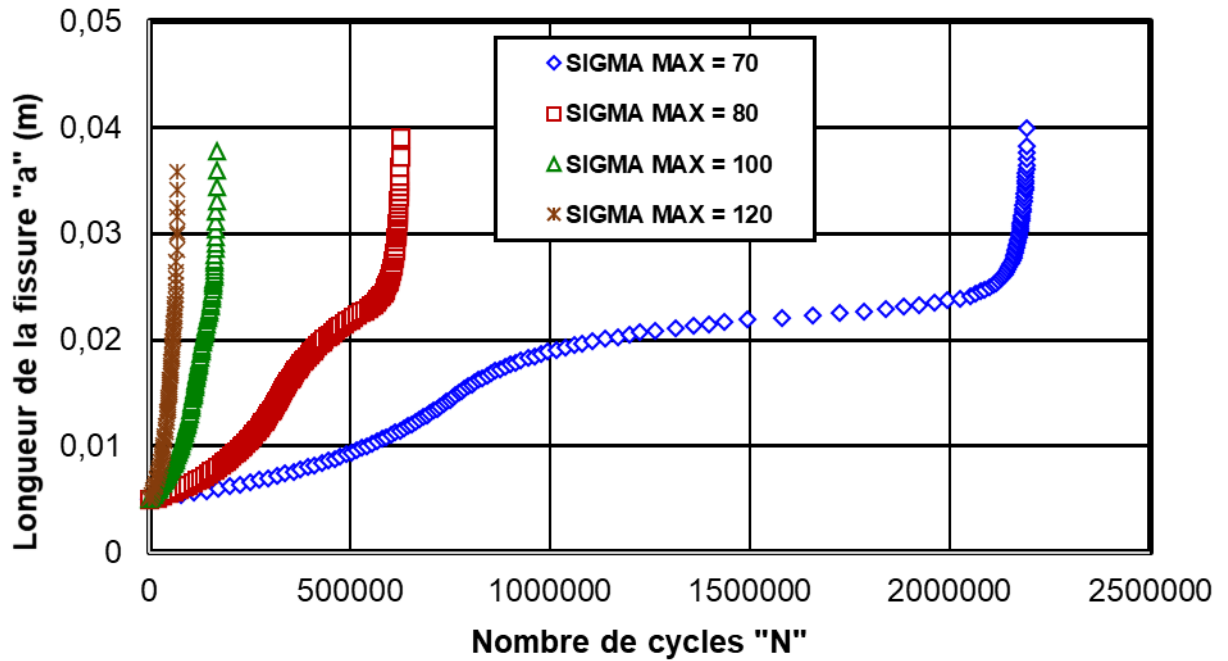


Figure 4. 11 : Évolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycles pour différents niveaux de contrainte maximale.

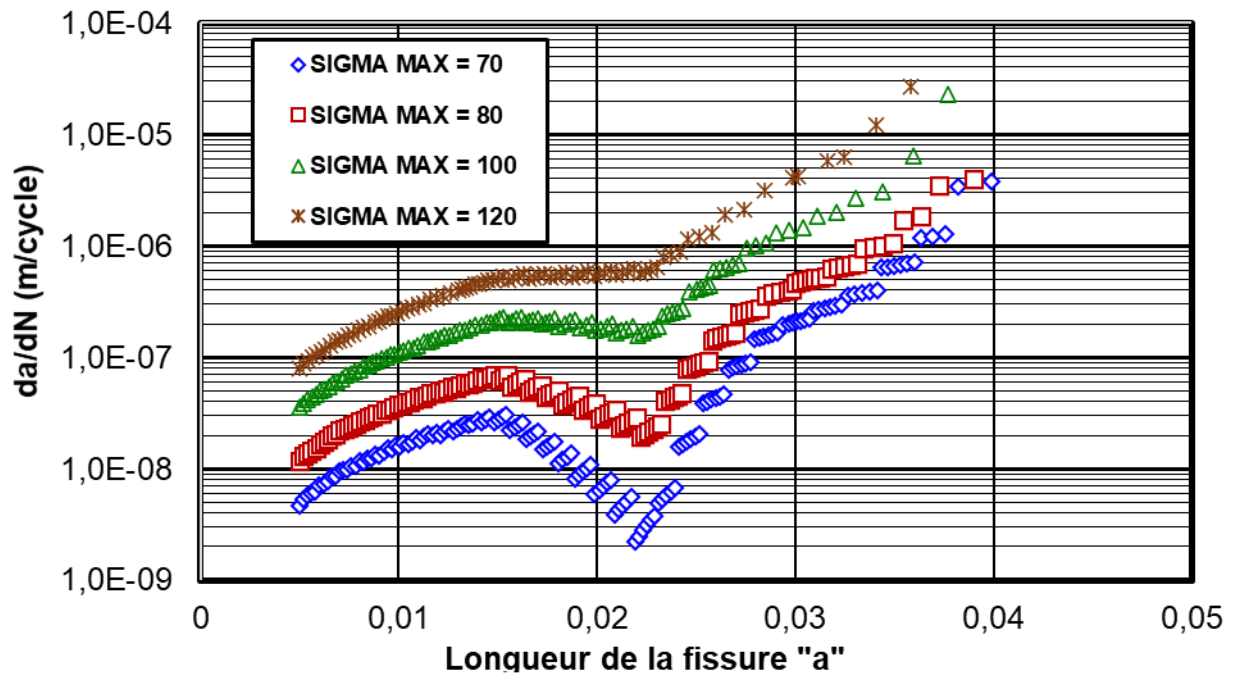


Figure 4. 12 : Évolution de la vitesse de propagation de fissure  $da/dN$  en fonction de la longueur de fissure a.

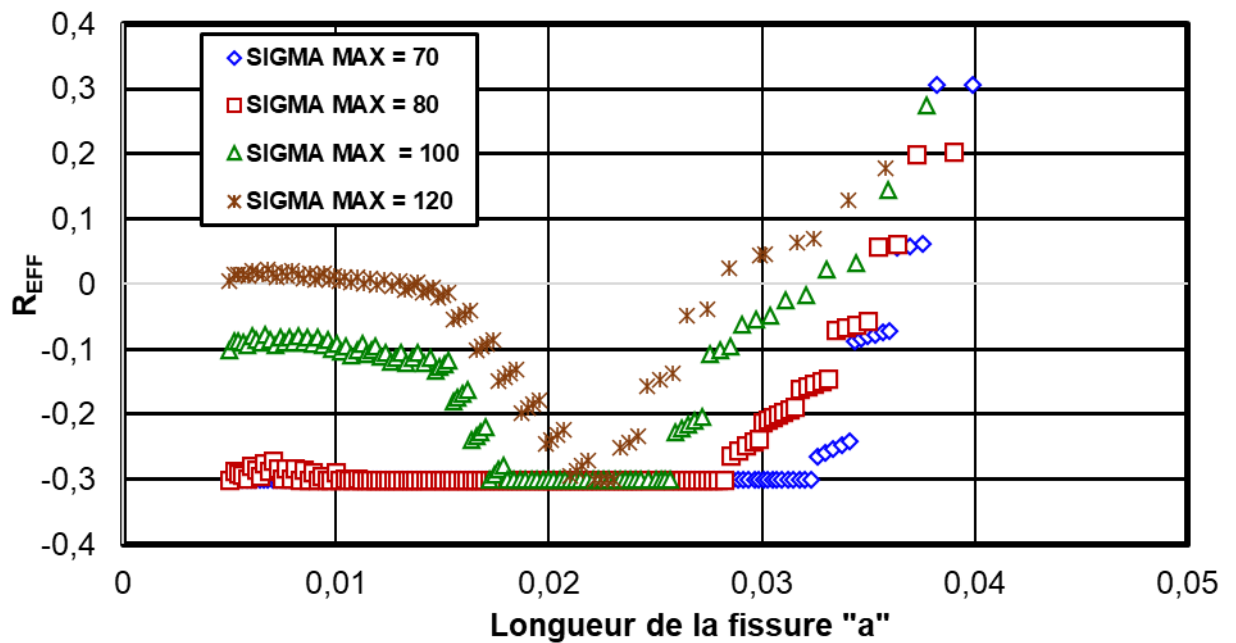


Figure 4. 13 : Évolution du coefficient Reff en fonction de la longueur de fissure a.

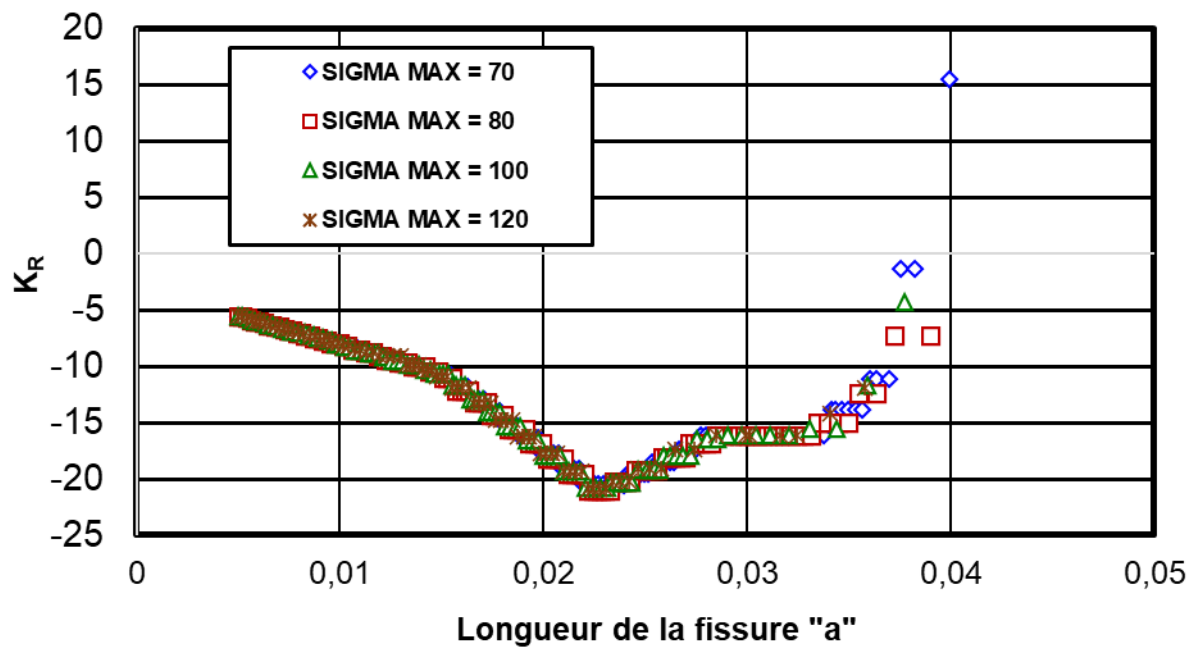


Figure 4. 14 : Évolution du facteur de fermeture Kr en fonction de la longueur de fissure a.

## VI. Comparaison entre des éprouvettes avec et sans contraintes résiduelles (CR et SCR)

Cette partie présente la comparaison du comportement en fissuration par fatigue entre éprouvette avec contraintes résiduelles CR et une autre sans contraintes résiduelles SCR dues au soudage par FSW, pour un rapport de charge  $R=0.33$  et une contrainte maximale de 80 MPa. La figure 4.14 représente la variation de la longueur de fissure « a » en fonction du nombre de cycle N. pour l'éprouvette avec condition SCR la propagation de fissure est relativement lente, on observe une croissance modérée environ une durée de vie de 100000 cycles avec longueur de fissure  $a=44$  mm.

La figure 4.16 met en relation la comparaison vitesses de propagation de fissure  $da/dN$  (m/cycle) en fonction du facteur d'intensité de contrainte  $\Delta K$ . Pour le cas en présence de contrainte résiduelle CR, on note une augmentation de la durée de vie à une valeur de 625000 cycles et une longueur finale de rupture de 40 mm du charge  $R= 0.33$ , par contre pour les éprouvettes soudées avec contraintes résiduelles, le rapport de charge est variable, varie de - 0.3 à 0.2 en fin de fissuration. On rappelle que cette variation est due à la variation du facteur  $K_r$  (figure 4.13).

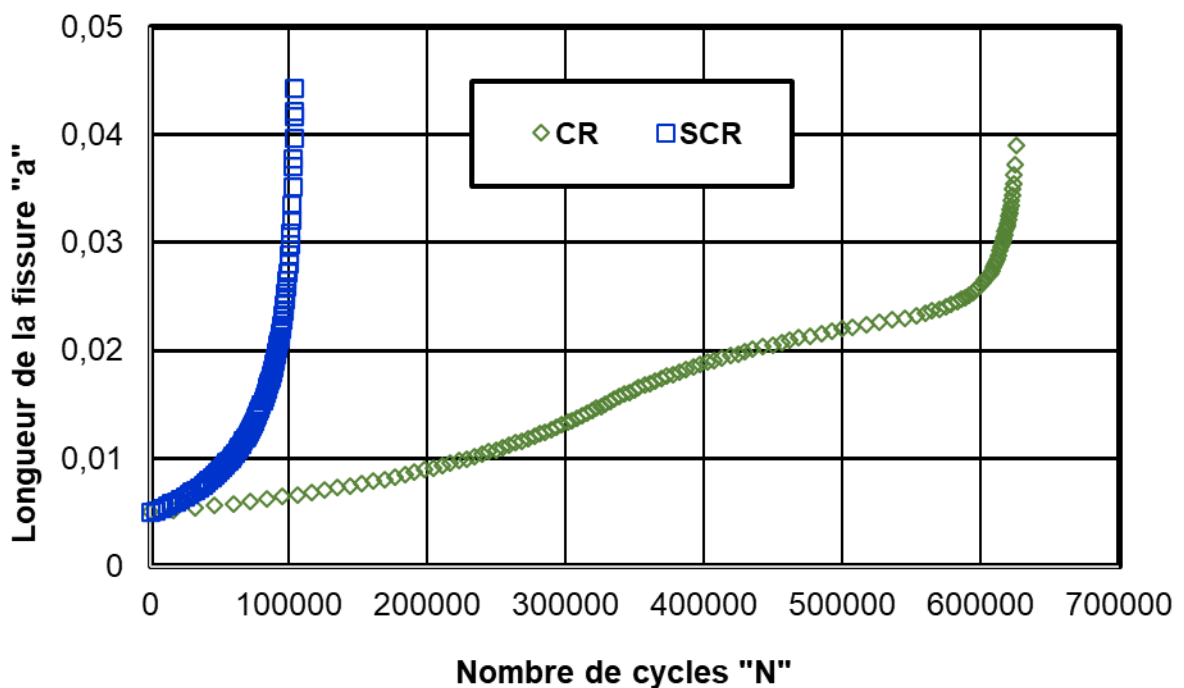


Figure 4. 15 : Evolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycles.

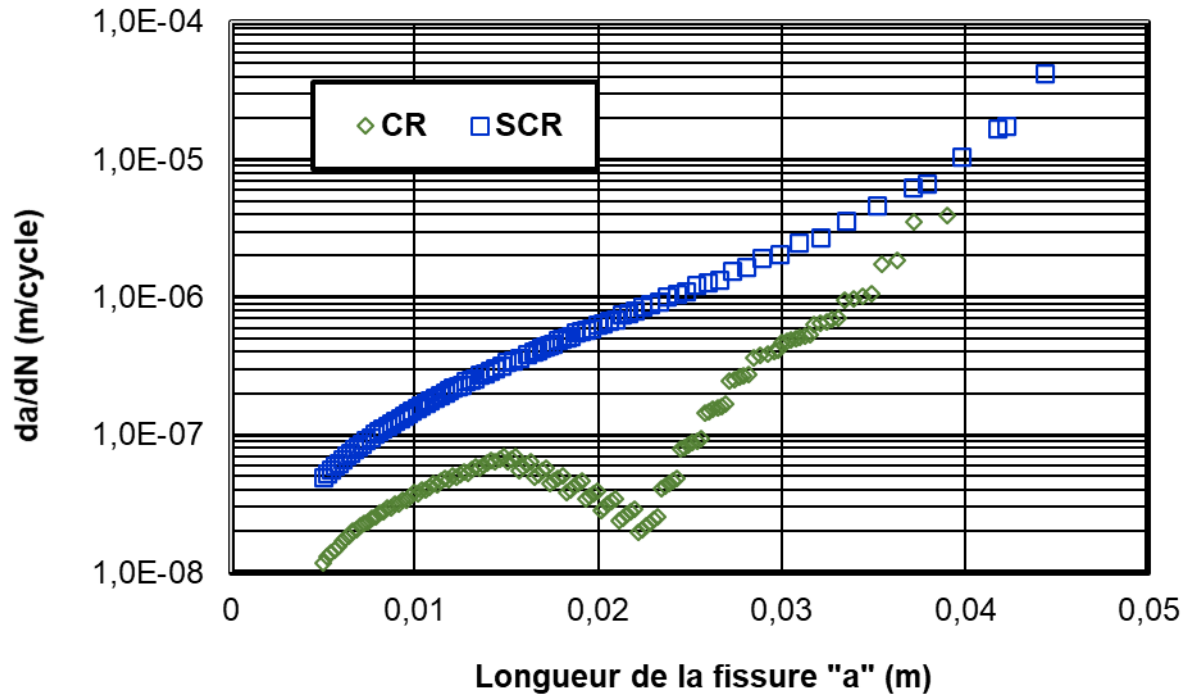


Figure 4. 16 : Vitesse de propagation de fissure en fonction de sa longueur.

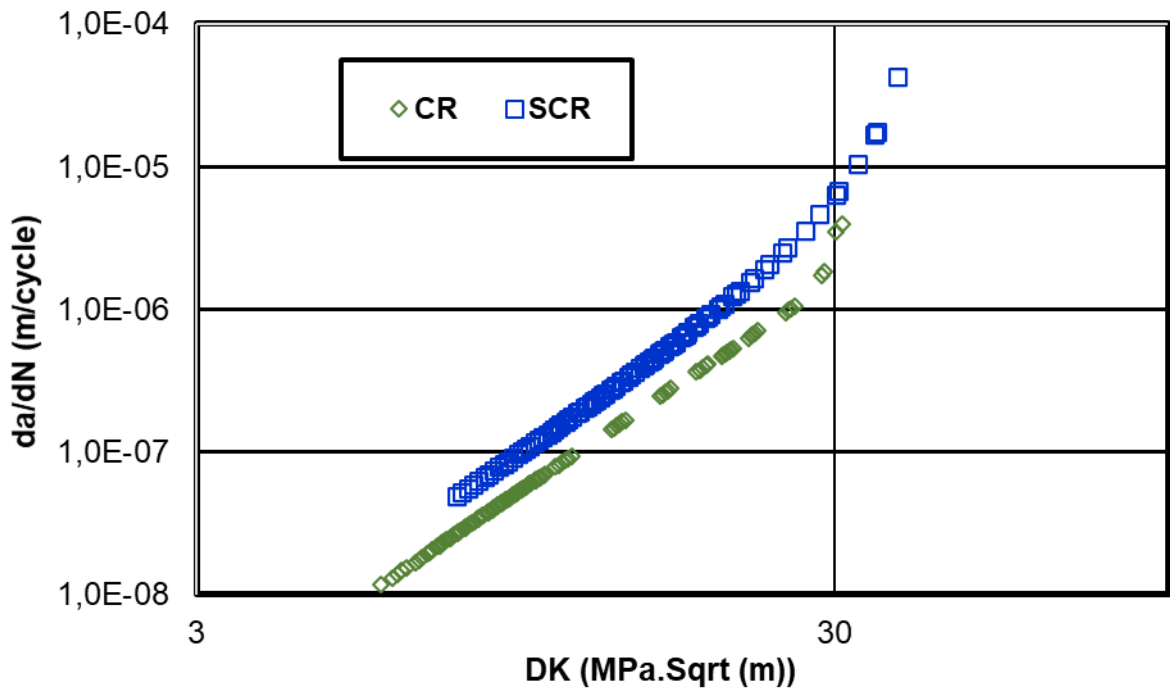


Figure 4. 17 : Vitesse de propagation de fissure en fonction de  $\Delta k$ .

## VII. Conclusion générale et perspective

Ce mémoire a permis d'étudier le comportement en fatigue des joints en alliage d'aluminium soudés par le procédé de soudage par friction-malaxage (FSW). Les contraintes résiduelles jouent un rôle clé dans la propagation des fissures, car elles peuvent accélérer ou ralentir leur développement. Une synthèse de l'état de l'art a présenté les effets de ces contraintes sur la durée de vie des structures soudés, en lien avec les paramètres de soudage et les caractéristiques du matériau.

Les résultats démontrent que les contraintes résiduelles de traction, principalement concentrées dans la zone de malaxage et la zone thermo-mécaniquement affectée (TMAZ), exacerbent la propagation des fissures en augmentant localement le facteur d'intensité de contrainte ( $\Delta K$ ).

Notre étude montre qu'une augmentation du rapport de charge entraîne une diminution de l'amplitude de chargement. Par exemple, lorsque le rapport  $R=0,1$ , l'amplitude est de 72, tandis que pour  $R=0,5$ , elle est réduite à 40. Par conséquent, la durée de vie augmente.

L'étude comparative entre les échantillons avec et sans contraintes résiduelles a permis de mieux comprendre l'influence du rapport de charge sur la résistance à la fatigue.

## Références

1. Linotte, B. (2019-2020). Caractérisation expérimentale du comportement en fatigue [Mémoire de master, Faculté des Sciences appliquées].
2. LinkedIn. (s. d.). What are the common failure modes and mechanisms in low-cycle fatigue? Consulté sur <https://fr.linkedin.com/advice/0>
3. Suresh, S. (1998). Fatigue of Materials (2<sup>e</sup> éd.). Cambridge University Press.
4. Lamraoui, M. M. (2012). Étude de la fatigue par flexion de l'acier inoxydable 316 L [Thèse de doctorat, École Nationale Polytechnique]. Alger, Algérie.
5. FEA Solutions. (s. d.). Crack Initiation and Propagation. Consulté sur <https://fea-solutions.co.uk>
6. Maltais, P. (2008). Développement d'une méthode de prédiction de la durée de vie en fatigue de structures tubulaires soudées en aluminium [Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi].
7. Davim, J. P. (Éd.). (2021). Welding Technology. Springer. (Collection Materials Forming, Machining and Tribology).
8. SDC Verifier. (s. d.). Fatigue Strength and Limit: Understanding Materials-Specific Data. Consulté sur <https://sdcverifier.com>
9. Mishra, R. S. et Ma, Z. Y. (2005). Friction stir welding and processing. Materials Science and Engineering: R: Reports, \*47\*(1-4), 1-78.
10. Stirweld. (s. d.). Friction Stir Welding Solutions. Consulté sur <https://stirweld.com>
11. Duval, M. (2018). Soudage de l'aluminium. Centre d'expertise et d'innovation sur l'aluminium.
12. Gastebois, S. (2015). Simulation numérique du soudage FSW à l'aide d'une approche multiphasique [Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers]. HAL. <https://pastel.hal.science>
13. Mohd Nasir, N. S., Abdul Razab, M. K. A., Mamat, S. et Iqbal, M. (2016). Review on welding residual stress. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, \*11\*(12), 6167-6173.
14. Góral, A. (s. d.). Analysis of Residual Stresses. [Manuscrit non publié].
15. Suzuki, T. (2022). How to Measure Residual Stress. Pulstec. Consulté sur <https://www.pulstec.net>

16. Zhang, X., Wang, J., Ma, Y., Liu, D., Gao, R., Xu, R., Zhao, Z., Chen, S. et 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*, \*301\*, 109956.
17. Buglioni, L., Tufaro, L. N. et Svoboda, H. G. (2015). Thermal cycles and residual stresses in FSW of aluminum alloys: Experimental measurements and numerical models. *Procedia Materials Science*, \*9\*, 87-96.
18. Dias, E. M., Kannan, V. et Dourado, N. (2021). Analysis of Residual Stresses and Dislocation Density of AA6082 Butt Welds Produced by Friction Stir Welding. *Journal of Manufacturing Processes*, \*64\*, 1297-1308.
19. El Mouhri, S., Essoussi, H., Ettaqi, S. et Benayoun, S. (2018). Relationship between Microstructure, Residual Stress and Thermal Aspect in Friction Stir Welding of Aluminum AA1050. *Procedia Manufacturing*, \*32\*, 889-894.
20. Pujono, M. N., Ilman, M. R., Muslih, M. et Kusmono. (2024). Minimizing residual stress and fatigue crack propagation rate of FSW joints of AA2024-T3 by transient thermal tensioning: Effect of heater distance. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, \*7\*, 668-677.
21. Giasson, L. (2003). Développement des méthodes de calcul et de mesure de la courbe J-R [Thèse de doctorat, Université du Québec à Rimouski].
22. Skorupa, M., Machniewicz, T. et Skorupa, A. (2005). The NASGRO strip yield model predictions on fatigue crack growth for aircraft aluminium alloys under constant amplitude and variable amplitude programmed and random loading. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, \*43\*(4), 907-926. <https://journals.pan.pl>