

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 : OUHSSAINE Ilyas

Sujet

Effet des contraintes résiduelles sur la propagation des fissures de fatigue sous chargements constants à amplitude variables

Soutenu publiquement, le 23 / 06 / 2026 , devant le jury composé de :

SEBAA Fethi	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
BENACHOUR Mustapha	Professeur	Univ. Tlemcen	Encadreur
BENACHOUR Nadjia	MCB	Univ. Tlemcen	Co- Encadreur
Medjadi Nassima	MAA	Univ. Tlemcen	Examineur

Année Universitaire 2025/2026

REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie Allah le Tout-Puissant de m'avoir accordé la santé, la volonté et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur, **Pr. BENACHOUR Mustapha**, pour son accompagnement, ses précieux conseils, sa disponibilité et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Mes sincères remerciements s'adressent également à ma co-encadreuse, **Mme BENACHOUR Nadja**, pour son aide, ses orientations pertinentes et l'intérêt qu'elle a porté à ce travail.

J'adresse mes vifs remerciements aux membres du jury, **Pr. SEBAA Fethi** et **Mme MEDJADI Nassima**, qui ont accepté d'évaluer ce mémoire et d'y consacrer leur temps et leur expertise.

Je remercie l'ensemble des enseignants du Département de Génie Mécanique de l'Université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen pour la qualité de leur enseignement et les connaissances qu'ils m'ont transmises tout au long de mon parcours universitaire.

Mes remerciements vont également à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Enfin, j'exprime toute ma reconnaissance et ma gratitude à mes parents, à ma famille ainsi qu'à mes amis pour leur soutien moral, leurs encouragements constants et leur confiance tout au long de mes études.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices, leurs encouragements permanents et leur soutien tout au long de mon parcours. Que Dieu les protège et leur accorde santé et bonheur.

À mes frères et sœurs, pour leur affection, leur présence et leur soutien précieux.

À toute ma famille, qui m'a toujours encouragé à poursuivre mes études et à atteindre mes objectifs.

À mes enseignants, qui m'ont transmis leurs connaissances et contribué à ma formation académique.

À mon encadreur et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

À mes amis et collègues, pour les moments de partage, d'entraide et de motivation.

Enfin, à tous ceux qui croient en la valeur du savoir et du travail.

ABSTRACT

Welded joints are widely used in critical industrial structures such as bridges, pipelines, and mechanical equipment. During the welding process, localized thermal cycles generate residual stresses in the (HAZ) and the (WM), which significantly influence the fatigue crack propagation behavior of these assemblies.

This study investigates the combined influence of welding residual stresses and variable amplitude loading on fatigue crack growth in welded joints, using the AFGROW software. The material studied is ASTM A645 Grade 45 steel. The geometric model consists of a 4 mm thick plate with a central hole and two initial cracks. Simulations were conducted under constant and variable amplitude loading spectra, with and without residual stresses, for various load ratios R (0.1, 0.3, and 0.5).

The results demonstrate a dual effect of residual stresses: tensile residual stresses accelerate crack propagation by increasing the effective load ratio R_{eff} and the effective stress intensity factor range ΔK_{eff} reducing fatigue life by up to approximately 20%. Conversely, compressive residual stresses promote crack closure and slow down crack growth, improving fatigue life. The interaction between residual stress fields and loading block sequences produces non-linear behavior that must be taken into account for reliable structural integrity assessments of welded structures.

Keywords: Fatigue crack growth, welding residual stresses, variable amplitude loading, AFGROW, load ratio, effective stress intensity factor.

ملخص

تُستخدم الوصلات الملحومة على نطاق واسع في المنشآت الصناعية الحيوية كالجسور والأنابيب والمعدات الميكانيكية. وخلال عملية اللحام، تولّد الدورات الحرارية الموضعية إجهادات متبقية في المنطقة المتأثرة حرارياً وفي معدن اللحام، مما يؤثر تأثيراً بالغاً على سلوك انتشار الشقوق الإجهادية في هذه التجمعات.

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم التأثير المشترك للإجهادات المتبقية الناجمة عن اللحام وأحمال الإجهاد المتغيرة السعة على نمو شقوق التعب في الوصلات الملحومة، وذلك باستخدام برنامج AFGROW. المادة المدروسة هي الفولاذ ASTM A645 Grade 45. يتكون النموذج الهندسي من لوح سُمكه 4 مم يحتوي على ثقب مركزي وشقين أوليين. أُجريت المحاكاة في ظل أطياف تحميل ذات سعة ثابتة ومتغيرة، مع الإجهادات المتبقية وبدونها، لقيم مختلفة من نسبة الحمل $R(0.1, 0.3, 0.5)$. تُظهر النتائج ازدواجية في تأثير الإجهادات المتبقية: فالإجهادات المتبقية الشديدة تُسرّع انتشار الشقوق عن طريق رفع نسبة الحمل الفعّالة R_{eff} ونطاق معامل شدة الإجهاد الفعّال ΔK_{eff} ، مما يُقلّص عمر التعب بنسبة تصل إلى 20% تقريباً. في المقابل، تُعزّز الإجهادات المتبقية الانضغاطية إغلاق الشق وتُبطئ نمو الشقوق، مما يحسّن عمر التعب. يُنتج التفاعل بين حقول الإجهادات المتبقية وتسلسل كتل الأحمال سلوكاً غير خطي يجب أخذه بعين الاعتبار للتقييم الموثوق لسلامة المنشآت الملحومة.

الكلمات المفتاحية: نمو شقوق التعب، الإجهادات المتبقية للحام، التحميل متغير السعة، AFGROW، نسبة الحمل، معامل شدة الإجهاد الفعّال.

RÉSUMÉ

Les assemblages soudés sont largement utilisés dans les structures industrielles critiques telles que les ponts, les pipelines et les équipements mécaniques. Lors du soudage, les cycles thermiques localisés génèrent des contraintes résiduelles dans la zone affectée thermiquement (ZAT) et dans le métal de soudure, qui influencent de manière significative le comportement en fissuration par fatigue de ces assemblages.

Cette étude porte sur l'influence combinée des contraintes résiduelles de soudage et des chargements à amplitude variable sur la propagation des fissures de fatigue dans les joints soudés, en utilisant le logiciel AFGROW. Le matériau étudié est l'acier ASTM A645 Grade 45. Le modèle géométrique consiste en une plaque de 4 mm d'épaisseur avec un trou central et deux fissures initiales. Les simulations ont été réalisées sous des spectres de chargement à amplitude constante et variable, avec et sans contraintes résiduelles, pour différentes valeurs du rapport de charge R (0,1 ; 0,3 ; et 0,5).

Les résultats mettent en évidence une dualité d'effet des contraintes résiduelles : les contraintes de traction accélèrent la propagation des fissures en augmentant le rapport de charge effectif R_{eff} et l'amplitude effective du facteur d'intensité de contrainte ΔK_{eff} , réduisant la durée de vie en fatigue d'environ 20%. À l'inverse, les contraintes compressives favorisent la fermeture de fissure et ralentissent la croissance, améliorant ainsi la durée de vie. L'interaction entre le champ de contraintes résiduelles et les séquences de blocs de chargement génère un comportement non linéaire qui doit être pris en compte pour une évaluation fiable de l'intégrité structurale des structures soudées.

Mots-clés : Propagation de fissures de fatigue, contraintes résiduelles de soudage, chargement à amplitude variable, AFGROW, rapport de charge, facteur d'intensité de contrainte effectif.

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Paramètres d'un cycle de chargement cyclique.....	4
Figure 1.2 : Les modes de rupture.....	6
Figure 1.3 : Évolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycles appliqués..	6
Figure 1.4 : Différents types des chargements cycliques.....	8
Figure 1.5 : Domaine d'existence des contraintes d'ordre 1.....	9
Figure 1.6 : Domaine d'existence des contraintes d'ordre 2.....	10
Figure 1.7 : Domaine d'existence des contraintes d'ordre 3.....	11
Figure 1.8 : Origine des contraintes Résiduelles dues au soudage	11
Figure 2.1 : Distribution schématique des contraintes résiduelles au voisinage d'un cordon de soudure	14
Figure 2.2 : Représentation typique de la loi de Paris en coordonnées logarithmiques.....	15
Figure 2.3 : Influence schématique des contraintes résiduelles sur la propagation de fissure	16
Figure 3.1 : Interface géométrie (AFGROW).....	20
Figure 3.2 : Interface matériau (AFGROW).....	21
Figure 3.3 : Interface chargement cyclique (AFGROW).....	21
Figure 3.4 : Interface contraintes résiduelles (AFGROW)	22
Figure 3.5 : Modèles géométriques des éprouvettes soudées et non soudées.....	24
Figure 4.1 : Effet du rapport «R» sur le nombre de cycles en fatigue pour $\sigma_{max} = 172 \text{ MPa}$	28
Figure 4.2 : Effet du rapport «R» sur la vitesse de fissuration pour $\sigma_{max} = 172 \text{ MPa}$	29
Figure 4.3 : Effet du rapport de charge R sur la propagation des fissures pour $\sigma = 172 \text{ MPa}$	30
Figure 4.4 : Évolution de R_{eff} en fonction de la longueur de fissure «a» pour $\sigma_{max} = 172 \text{ MPa}$	30
Figure 4.5 : Chargement variable pour $R = 0.3$ et ($\sigma_1 = 172 \text{ MPa}$, $\sigma_2 = 206.4 \text{ MPa}$).....	31
Figure 4.6 : Chargement variable pour $R = 0.3$ et ($\sigma_1 = 206.4 \text{ MPa}$, $\sigma_2 = 172 \text{ MPa}$).....	31
Figure 4.7 : Chargement variable pour $R = 0.3$ et ($\sigma_1 = 172 \text{ MPa}$, $\sigma_2 = 206.4 \text{ MPa}$, $\sigma_1 = 172 \text{ MPa}$).....	32
Figure 4.8 : Effet de bloc de chargement : longueur de fissure «a» en fonction du nombre de cycles N.....	33
Figure 4.9 : Effet de bloc de chargement : taux de propagation da/dN en fonction de «a»....	33
Figure 4.10 : Effet de bloc de chargement : vitesse de propagation da/dN en fonction de ΔK	34
Figure 4.11 : Effet de bloc de chargement : R_{eff} en fonction de la longueur de fissure «a»..	35
Figure 4.12 : Effet de l'amplitude de chargement sur la durée de vie pour $R = 0.3$	36

Figure 4.13 : Effet de l'amplitude de chargement sur la vitesse de fissuration pour $R = 0.3$	37
Figure 4.14 : Effet du chargement : vitesse de propagation da/dN en fonction de ΔK	38
Figure 4.15 : Évolution de $Reff$ en fonction de la longueur de fissure «a» (amplitude variable)	38
Figure 4.16 : Évolution du facteur Kr en fonction de la longueur «a»	39
Figure 4.17 : Chargement variable pour $R = 0.3$ et ($\sigma_1 = 172$ MPa, $\sigma_2 = 206.4$ MPa, $\sigma_1 = 172$ MPa)	40
Figure 4.18 : Effets des contraintes résiduelles sur l'évolution de la longueur de fissure (bloc 5000–10000–5000)	41
Figure 4.19 : Effet des contraintes résiduelles et chargements cycliques sur la vitesse de fissuration	42
Figure 4.20 : Effet des contraintes résiduelles : da/dN en fonction de ΔK	42
Figure 4.21 : Évolution du rapport $Reff$ en fonction de «a» en présence des contraintes résiduelles (bloc 5000–10000–5000)	43
Figure 4.22 : Chargement variable pour $R = 0.3$ et ($\sigma_1 = 172$ MPa, $\sigma_2 = 206.4$ MPa) – bloc 10000–10000	44
Figure 4.23 : Effets des contraintes résiduelles sur l'évolution de la longueur de fissure (bloc 10000–10000 croissant)	44
Figure 4.24 : Effet des contraintes résiduelles sur la vitesse de fissuration (bloc croissant)	45
Figure 4.25 : Effet des contraintes résiduelles : da/dN en fonction de ΔK (bloc croissant)	46
Figure 4.26 : Évolution du rapport $Reff$ en fonction de «a» – bloc 10000–10000 croissant	46
Figure 4.27 : Chargement variable pour $R = 0.3$ et ($\sigma_1 = 206.4$ MPa, $\sigma_2 = 172$ MPa) – bloc 10000–10000	47
Figure 4.28 : Effets des contraintes résiduelles sur l'évolution de la longueur de fissure (bloc décroissant)	48
Figure 4.29 : Effet des contraintes résiduelles sur la vitesse de fissuration (bloc décroissant)	49
Figure 4.30 : Effet des contraintes résiduelles : da/dN en fonction de ΔK (bloc décroissant)	50
Figure 4.31 : Évolution du rapport $Reff$ en fonction de «a» – bloc 10000–10000 décroissant	51

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Classification des contraintes résiduelles.....	12
Tableau 3.1 : Composition chimique	25
Tableau 3.2 : Propriétés mécaniques	25
Tableau 3.3 : Paramètres de l'équation NASGRO.	26

Liste des abréviations

Symbole	Désignation	Unité
$S_a=\sigma_a$	Demi-amplitude de contrainte	MPa
$\Delta S=\Delta\sigma$	Amplitude de contrainte	MPa
$S_m=\sigma_m$	Contrainte moyenne	MPa
$S_{\max}=\sigma_{\max}$	Contrainte maximale	MPa
$S_{\min}$	Contrainte minimal	MPa
ΔS	Variation totale de contrainte	
A	Longueur de fissure	M
$R=\frac{S_{\min}}{S_{\max}}$	Rapport de charge	
ΔK_I	Facteur d'intensité de contrainte	MPa.Sqrt(m)
ΔK_{th}	Amplitude du facteur d'intensité de contrainte seuil	MPa.Sqrt(m)
K_{IC}	Le facteur d'intensité de contrainte critique	MPa.Sqrt(m)
N	Nombre de cycles	Cycles
$\frac{da}{dN}$	Vitesse de fissuration	M/Cycles
ΔK	Amplitude Facteur d'intensité de contrainte	MPa.Sqrt(m)
C	Constant de matériau	
σ_r	Contrainte résiduelles	
K_{eff}	Facteur d'intensité de contrainte effectif	MPa.Sqrt(m)
$K_{\max}$	Facteur d'intensité de contrainte maximal	MPa.Sqrt(m)
K_r	Facteur d'intensité de contrainte normalisé	MPa.Sqrt(m)
$K_{\min}$	Facteur d'intensité de contrainte minimal	MPa.Sqrt(m)
ν	Coefficient de poisson	

Table des matières

Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Généralité	3
Sur la fissuration par fatigue	3
1 Introduction :.....	4
2 Généralité Sur la fissuration par fatigue :	4
2.1 Définition :	4
2.2 Mécanismes de fissuration par fatigue :.....	5
2.2.1 Amorçage de fissure :.....	5
2.2.2 Propagation de fissure	5
.....	Erreur ! Signet non défini.
2.2.3 Rupture finale	6
2.3 Types de chargements :.....	7
2.3.1 Amplitude constante :	7
2.3.2 Amplitude variable :	7
2.3.3 Chargement à deux blocs d'amplitude constante.....	7
2.3.4 Chargement à plusieurs blocs d'amplitude constante.	8
3. Contraintes résiduelles :	9
3.1 Définition :	9
3.2 Origine des contraintes résiduelles :	10
3.3 Classification des contraintes résiduelles :	12
Chapitre II : Etat de l'art	13
1 Contraintes résiduelles dues au soudage :	14
2 Influence des contraintes résiduelles sur la propagation des fissures :.....	15
3 Chargements cycliques à amplitude variable :	17
4 Blocs de chargement :.....	18
5 Interaction entre résiduelles et blocs de chargement contraint :	18
CHAPITRE III : Méthodologie de Prédiction & Données Expérimentales.....	19
2.1 Modèle de willenborg :	23
3.1 Modèle géométrique :.....	24
3.2 Matériau d'étude :.....	26
CHAPITRE IV: Résultats & Discussion	27

1. Effet du rapport de charge "R" :	28
2. Effet du bloc de chargement :	31
3. Effet de l'amplitude de chargement :	36
4. Effet du bloc de chargement avec et sans contraintes résiduelles :	40
Conclusion :	52
Conclusion général :	52

Introduction Générale

Introduction Générale

Les assemblages soudés sont largement utilisés dans l'industrie pour assurer la continuité mécanique des structures soumises à des sollicitations importantes. Cependant, ils sont souvent exposés à des chargements cycliques pouvant provoquer des phénomènes de fatigue et des défaillances structurelles. Parmi les facteurs influençant leur comportement en fatigue, les contraintes résiduelles générées lors du soudage occupent une place majeure. Issues des cycles thermiques de chauffage et de refroidissement, elles modifient l'état de contrainte dans la zone affectée thermiquement et influencent directement l'amorçage ainsi que la propagation des fissures.

L'étude de la propagation des fissures est essentielle pour estimer la durée de vie des structures soudées. La résistance à la fatigue des soudures est généralement inférieure à celle du matériau de base en raison des défauts de soudage, des transformations microstructurales et des contraintes résiduelles. Les contraintes résiduelles de traction favorisent la croissance des fissures, tandis que les contraintes de compression la ralentissent. Ainsi, la prise en compte de ces contraintes dans les modèles de calcul et de prédiction de la durée de vie permet d'améliorer la précision des évaluations et la fiabilité des analyses de sécurité des structures soudées.

Le but de ce mémoire est d'étudier les effets des contraintes résiduelles et les chargements cycliques à l'amplitudes variables sur le comportement en fatigue des joints soudés

Selon le plant suivant

- Le premier chapitre établit les bases théoriques relatives à la fissuration par fatigue et aux contraintes résiduelles.
- Le deuxième chapitre dresse un état de l'art centré sur les effets des contraintes résiduelles de soudage sur la propagation des fissures.
- Le troisième chapitre décrit la méthodologie de simulation numérique, le matériau retenu et la géométrie modélisée.
- Le quatrième chapitre présente et discute les résultats obtenus, avant de conclure par des perspectives.

Chapitre I : Généralité

Sur la fissuration par fatigue

1 Introduction :

La durée de vie en fatigue d'un composant se compose de deux phases principales : l'amorçage d'une microfissure et sa propagation jusqu'à la rupture final.

En raison de la présence fréquente de défauts initiaux ou générés en service, l'analyse se concentre principalement sur la croissance des fissures existantes, considérée comme le mécanisme gouvernant la défaillance.

La prédiction de cette croissance repose sur des lois de propagation issues d'essais normalisés, reliant la vitesse de propagation aux paramètres de chargement.

Toutefois, une évaluation fiable de la durée de vie nécessite une compréhension approfondie des mécanismes réels de propagation et de l'influence des conditions de service.

2 Généralité Sur la fissuration par fatigue :

2.1 Définition :

On désigne par fatigue des matériaux le processus d'endommagement cumulatif résultant de l'application répétée de contraintes ou de déformations alternées. La particularité de ce phénomène réside dans le fait qu'il peut conduire à la rupture d'une pièce pour des niveaux de contrainte très inférieurs à sa résistance statique, après un nombre suffisamment élevé de cycles. La rupture par fatigue obéit à un enchaînement de trois phases distinctes : l'amorçage de microfissures dans les régions de concentration de contraintes ou de défauts surfaciques, leur propagation stable sous l'effet des cycles répétés, et enfin une rupture brutale lorsque la section portante devient insuffisante pour reprendre les efforts appliqués.

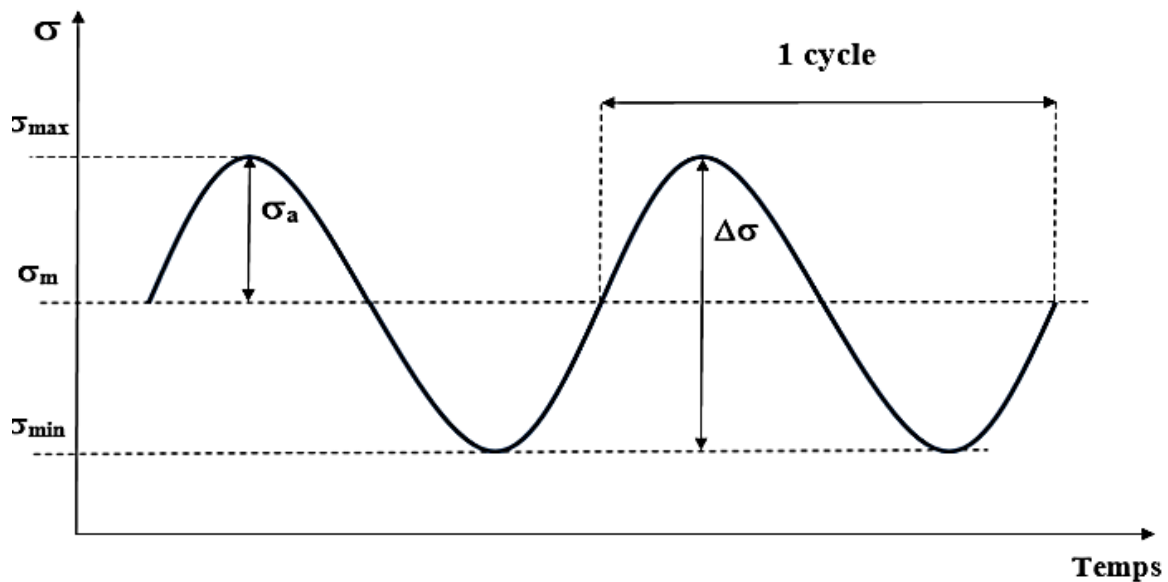


Figure 1.1 : Paramètres d'un cycle de chargement cyclique [2]

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

2.2 Mécanismes de fissuration par fatigue :

Le mécanisme d'endommagement par fatigue au sein d'une structure ou d'une pièce mécanique s'opère selon un processus progressif comportant plusieurs phases successives. Des défauts initiaux peuvent se développer dans un matériau initialement sain, puis évoluer de manière stable jusqu'à la rupture finale de la pièce.

La fissuration par fatigue se déroule en trois étapes principales :

2.2.1 Amorçage de fissure :

L'amorçage de fissure constitue la phase initiale de l'endommagement en fatigue. Il résulte de concentrations de déformation plastique localisée, généralement situées en surface, aux emplacements de défauts géométriques, d'inclusions ou de discontinuités microstructurales. Dans les assemblages soudés, le pied de cordon et la zone affectée thermiquement (ZAT) représentent des sites d'amorçage privilégiés, en raison des contraintes résiduelles qui y règnent et des hétérogénéités métallurgiques introduites par le procédé. La phase d'amorçage est souvent difficile

à détecter expérimentalement ; elle précède la phase de propagation, dont l'analyse relève des outils de la mécanique de la rupture.

2.2.2 Propagation de fissure

Une fois amorcée, la fissure se propage progressivement sous l'effet des cycles de charge.

La propagation est généralement stable et peut être décrite par la mécanique linéaire de la rupture.

La fissuration par fatigue peut se produire selon trois modes principaux.

Le mode I correspond à une propagation de la fissure perpendiculaire à la surface, sous l'effet de contraintes de traction, provoquant l'ouverture des lèvres de la fissure ; il est fréquent dans les matériaux à forte résistance en traction.

Le mode II se caractérise par une propagation parallèle à la surface avec glissement des lèvres sous des contraintes de cisaillement, phénomène courant dans les matériaux ductiles.

Le mode III correspond à une propagation oblique associée à des contraintes de torsion, entraînant une déformation en torsion des bords de la fissure.

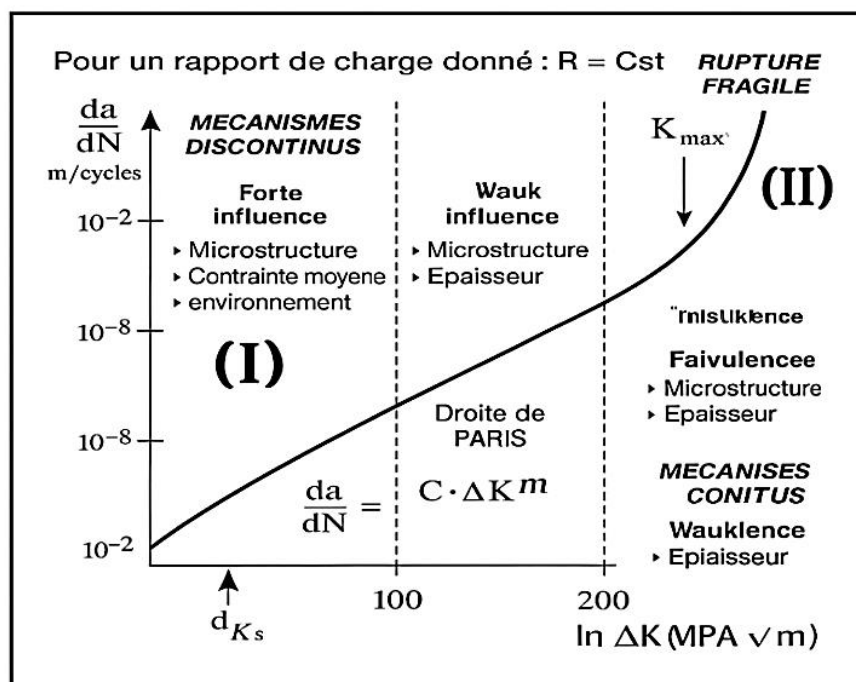


Figure 1.2 : Variation de la vitesse de fissuration en fonction du facteur d'intensité de contrainte [4]

2.2.3 Rupture finale

La rupture finale intervient lorsque la longueur de fissure dépasse une valeur critique pour laquelle le facteur d'intensité de contrainte atteint la ténacité à la rupture du matériau ($K \geq K_{IC}$). À ce stade, la section résistante ne peut plus équilibrer les charges appliquées, et la rupture se produit de manière rapide et incontrôlée. Dans les structures soudées, la combinaison des contraintes

résiduelles et des hétérogénéités mécaniques peut considérablement abaisser le seuil critique et précipiter cette phase finale.

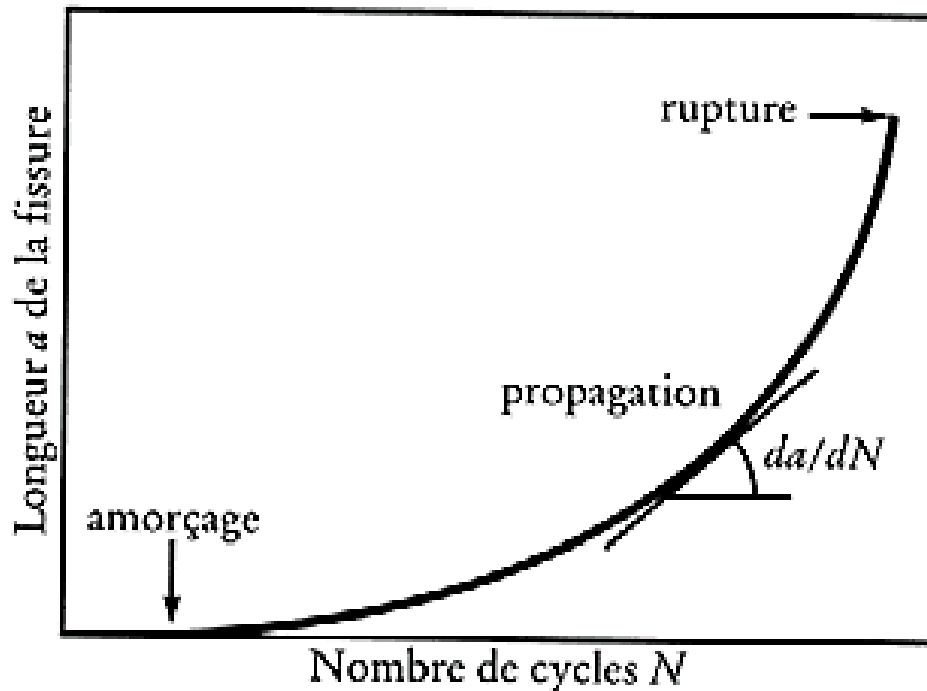


Figure1.3 Evolution de la longueur de fissure V.S. nombre de cycle [9]

2.3 Types de chargements :

Les sollicitations responsables de l'endommagement par fatigue sont de nature cyclique. Elles se distinguent principalement selon la régularité de leur amplitude au cours du temps et selon la relation entre leurs différentes composantes.

2.3.1 Amplitude constante :

Un chargement cyclique est dit à amplitude constante lorsque les valeurs maximale, minimale et moyenne de la contrainte restent invariantes d'un cycle à l'autre. Ce type de sollicitation, bien que schématique, constitue la base des essais de caractérisation en fatigue et se rencontre dans certains systèmes mécaniques fonctionnant en régime établi, comme les machines rotatives ou les enceintes soumises à des cycles répétitifs de pressurisation.

2.3.2 Amplitude variable :

Un chargement à amplitude variable se caractérise par une évolution des niveaux de contrainte d'un cycle à l'autre. Ce mode de sollicitation reproduit plus fidèlement les conditions de service réelles, où les charges subies par une structure varient en fonction des sollicitations opérationnelles. Dans certains cas, cette variabilité présente une certaine périodicité, comme dans

le cycle décollage-vol-atterrissage d'un aéronef ; dans d'autres cas, elle est totalement aléatoire, à l'image des vibrations transmises à un véhicule par un revêtement routier irrégulier ou des sollicitations sismiques.

2.3.3 Chargement à plusieurs blocs d'amplitude constante.

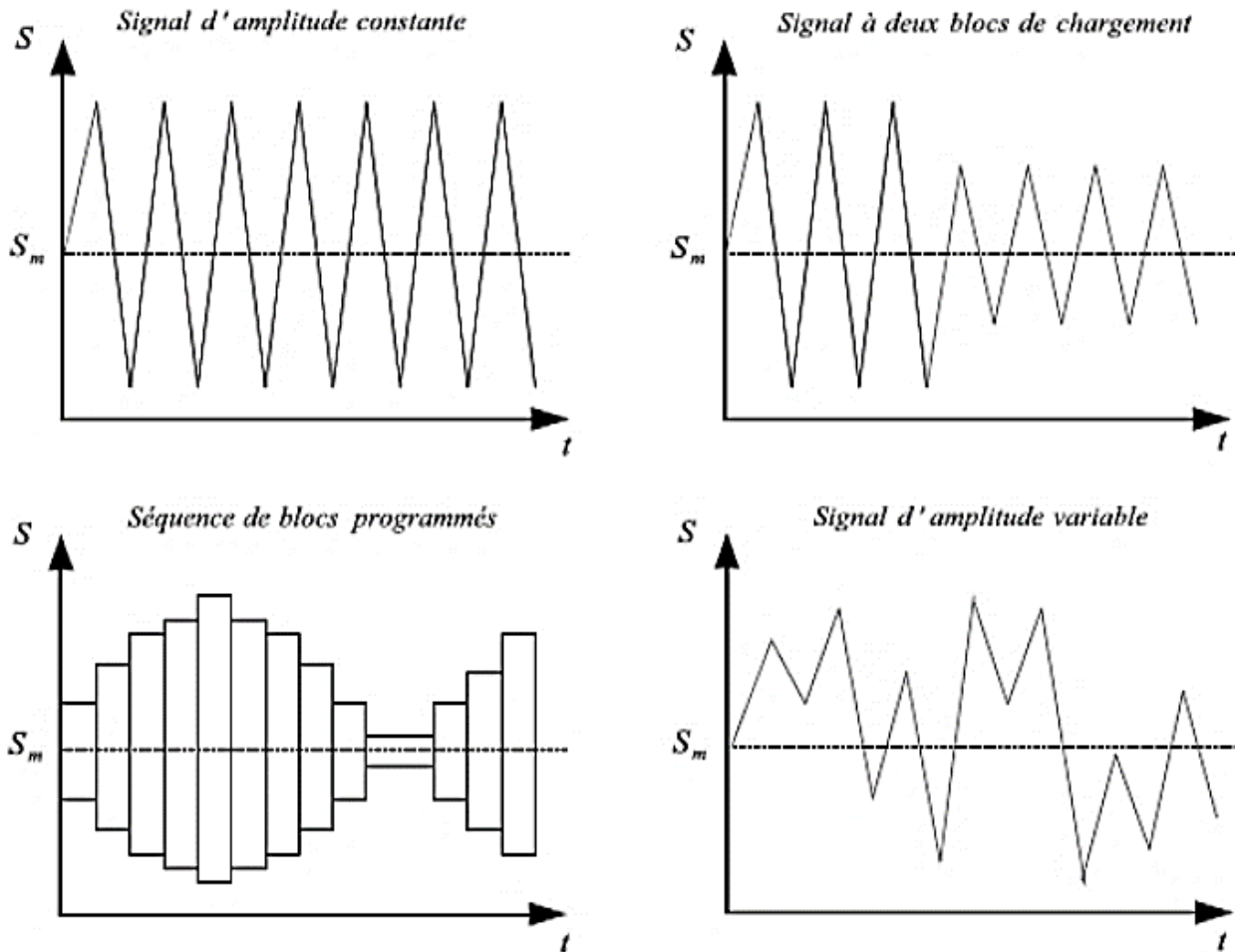


Figure1.4 : Différents types des chargements cycliques. [8]

3. Contraintes résiduelles :

3.1 Définition :

Les contraintes résiduelles sont des contraintes internes qui existent dans un matériau en l'absence de charges externes. Elles proviennent principalement des déformations plastiques et des variations de volume au cours des procédés de fabrication et des traitements technologiques. Bien que le développement d'outils de calcul numérique ait simplifié leur prévision, les méthodes expérimentales pour les évaluer doivent encore être fiables, car elles restent complexes.

Premier ordre :

Les contraintes résiduelles d'ordre 1 sont macroscopiques, homogènes sur plusieurs grains, équilibrées dans chaque section et traitées par la MMC



Figure 1.5 : Domaine d'existence des contraintes d'ordre [15]

Deuxième ordre :

Les contraintes résiduelles de second ordre sont à la fois homogènes à l'échelle d'un grain ou d'une portion de grain et découlent des disparités d'orientation cristalline entre les grains adjacents. Ces contraintes à l'échelle microscopique sont en équilibre à travers divers grains, et toute modification de cet équilibre est susceptible d'induire des modifications dimensionnelles à une échelle macroscopique de la pièce.

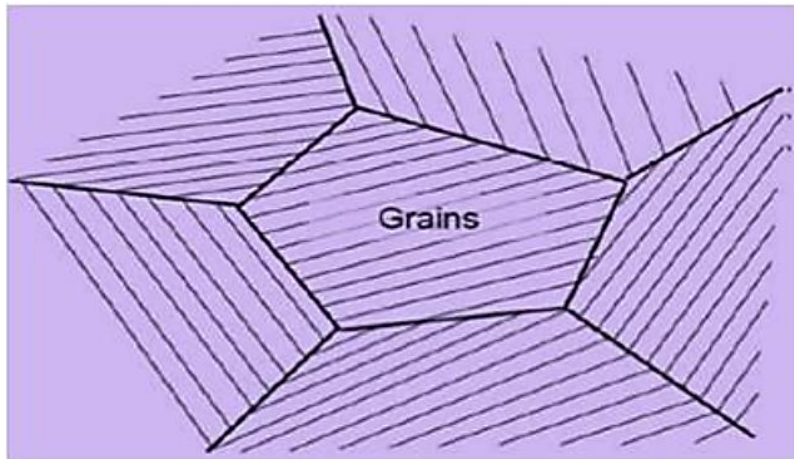


Figure1.6 : Domaine d'existence des contraintes [15]

Troisième ordre

Les contraintes résiduelles de troisième ordre, hétérogènes à l'échelle atomique et liées aux déformations survenant autour des imperfections cristallines, s'équilibrent au sein de très petites sections de grains. Elles n'entraînent pas de modifications dimensionnelles à grande échelle. Cette classification (niveaux 1 à 3) démontre que toute irrégularité de déformation, peu importe l'ampleur, produit des contraintes résiduelles, dont seules celles de niveau 1 sont gérées par la mécanique des milieux continus.

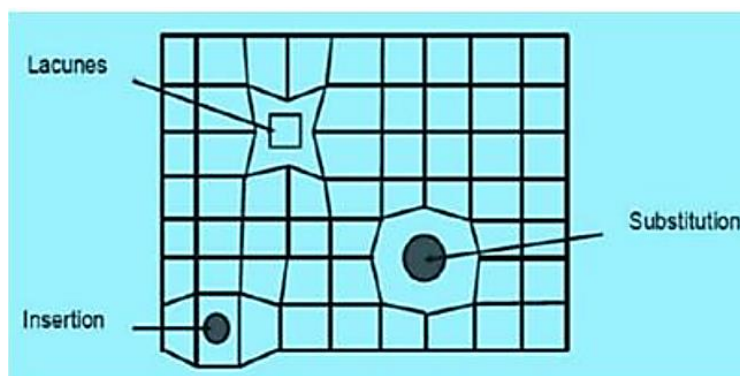


Figure1.7 : Domaine d'existence des contraintes d'ordre [15]

3.2 Origine des contraintes résiduelles :

Durant le processus de soudure, l'influence thermique localisée génère des gradients de température prononcés. L'expansion de la zone chauffée est entravée par le matériau environnant qui reste froid, ce qui conserve le métal apporté vers la chaleur sous une compression plastique. Lorsque le cordon de soudure refroidit et se contracte, la zone qui a subi une déformation plastique essaie de se rétracter, mais est contrainte par le matériau environnant, ce qui crée des tensions de

traction résiduelles dans la soudure et la zone affectée par la chaleur (ZAT), compensées par des contraintes de compression plus loin.

ORIGINE DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES DANS LE SOUDAGE

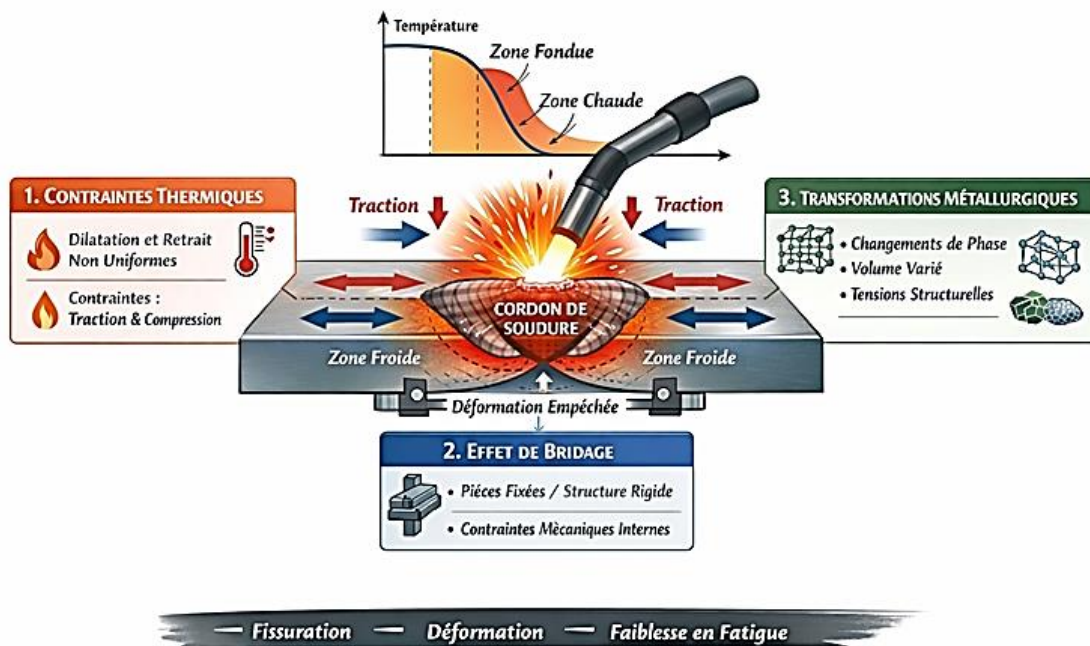


Figure1.8 : Origine des contraintes Résiduelles dues au soudage

Contraintes thermiques

Le soudage engendre des gradients thermiques importants conduisant à une dilatation non uniforme du matériau. À chaud, la dilatation contrainte génère des contraintes de compression, tandis qu'au refroidissement, la contraction entravée induit des contraintes de traction. Après solidification, l'état résiduel se caractérise généralement par des contraintes de traction dans le cordon de soudure et de compression dans les zones environnantes.

Contraintes métallurgiques

Lors du refroidissement, des transformations de phase, comme la conversion de l'austénite en martensite, entraînent des variations de volume et des modifications microstructurales. Ces transformations génèrent des contraintes internes supplémentaires, qui s'ajoutent aux contraintes thermiques, complexifiant ainsi l'état final des contraintes résiduelles dans les assemblages soudés.

Contraintes mécaniques résiduelles

Lors du soudage, le maintien des pièces par bridages ou leur intégration dans une structure rigide empêche la déformation libre, entraînant une accumulation importante de contraintes internes. Ce

phénomène est accentué pour des pièces épaisses, de géométrie complexe ou fortement serrées, augmentant l'intensité et l'hétérogénéité des contraintes résiduelles.

3.3 Classification des contraintes résiduelles :

On distingue généralement trois types de contraintes résiduelles dans un assemblage soudé :

Type de contrainte	Zone typique	Effet sur la propagation de fissures
Traction	Pied de soudure, zone affectée par la chaleur (ZAT)	Favorise l'amorçage de la fissuration par fatigue.
Compression	Sous-jacent à la zone fondue	Peut retarder ou bloquer la propagation des fissures
Cisaillement	Transition entre ZAT et MB	Contribue à la complexité du champ de contrainte et à la rupture

Tableau 2 2: Classification des contraintes résiduelles

Chapitre II : Etat de l'art

1. Contraintes résiduelles dues au soudage :

Les contraintes résiduelles désignent les contraintes intrinsèques existantes dans un matériau sans l'application d'une charge externe. Pendant le processus de soudage, la zone fusionnée et la zone affectée par la chaleur passent par des cycles de réchauffement et de réfrigération très rapides. Les déformations plastiques incompatibles, qui sont à l'origine des contraintes résiduelles, sont causées par l'expansion suivie de contractions irrégulières.

Dans les joints soudés, des tensions de traction avoisinant la limite d'élasticité sont souvent observées à la fois dans le cordon et la zone affectée par la chaleur, tandis que des forces de compression se mettent en place à plus grande distance pour maintenir l'équilibre.

Ces restrictions entraînent diverses répercussions :

- Diminution de l'effet de fermeture de fissure
- Accélération de la propagation si elles sont en traction
- Ralentissement si elles sont en compression.

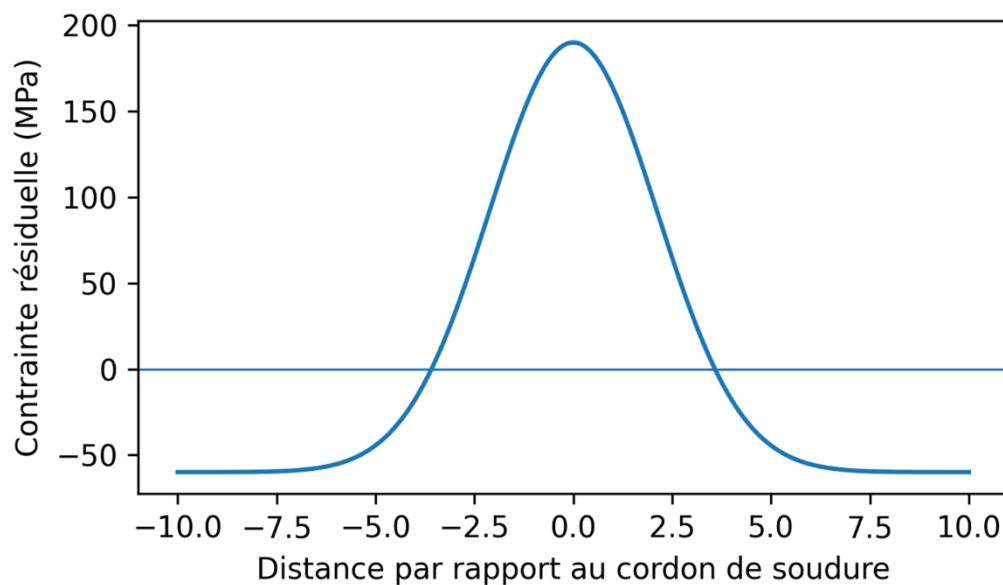


Figure 2.1 : Distribution schématisée des contraintes résiduelles au voisinage d'un cordon de soudure.

2. Impact des contraintes résiduelles sur la propagation des fissures :

La croissance des fissures de fatigue est conventionnellement décrite par la loi empirique de Paris-Erdogan :

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad (2.1)$$

dans laquelle da/dN représente la vitesse d'avancement de la fissure par cycle de chargement, ΔK l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte, et C et m deux constantes caractéristiques du matériau. Les contraintes résiduelles interfèrent directement avec ce mécanisme en modifiant la valeur moyenne du facteur d'intensité de contrainte ainsi que le rapport de charge effectif R_{eff} . Des contraintes résiduelles de traction tendent à maintenir les lèvres de la fissure ouvertes et augmentent ainsi ΔK_{eff} , accélérant la propagation. Des contraintes de compression produisent l'effet inverse en favorisant la fermeture de fissure et en réduisant da/dN .

Ces effets ont des conséquences directes sur la durée de vie des structures : les contraintes en résiduelles tensiles diminuent la tenue fatigue, tandis que les contraintes compressives peuvent significativement prolonger la durée de vie. La prise en compte de ces contraintes est donc indispensable dans tout modèle de prédiction fiable, en particulier lorsque les chargements sont de type variable.

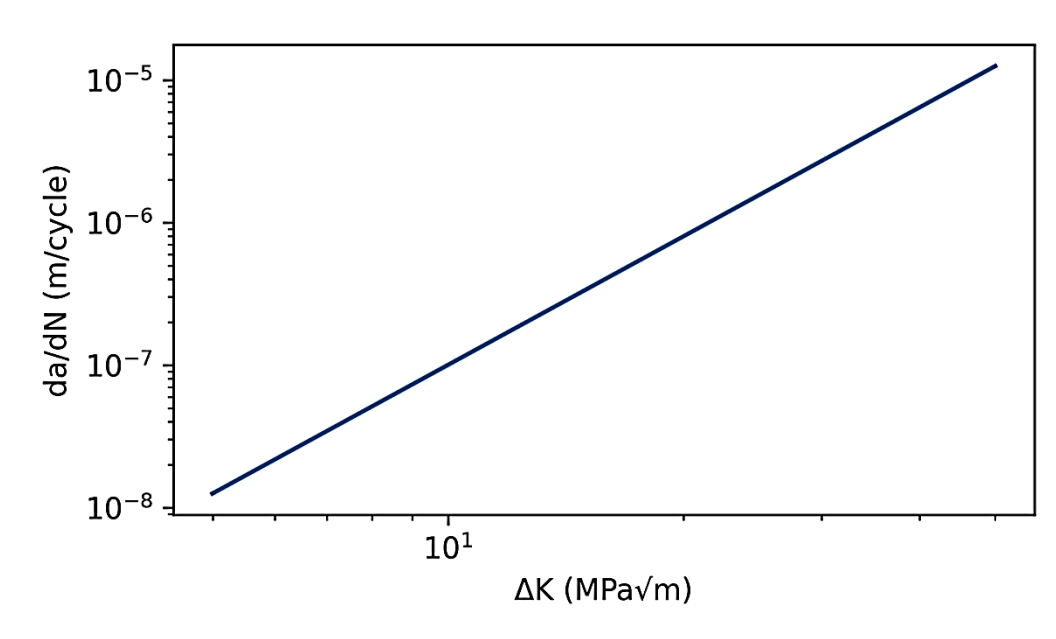


Figure 2.2 : Représentation typique de la loi de Paris en coordonnées logarithmiques.

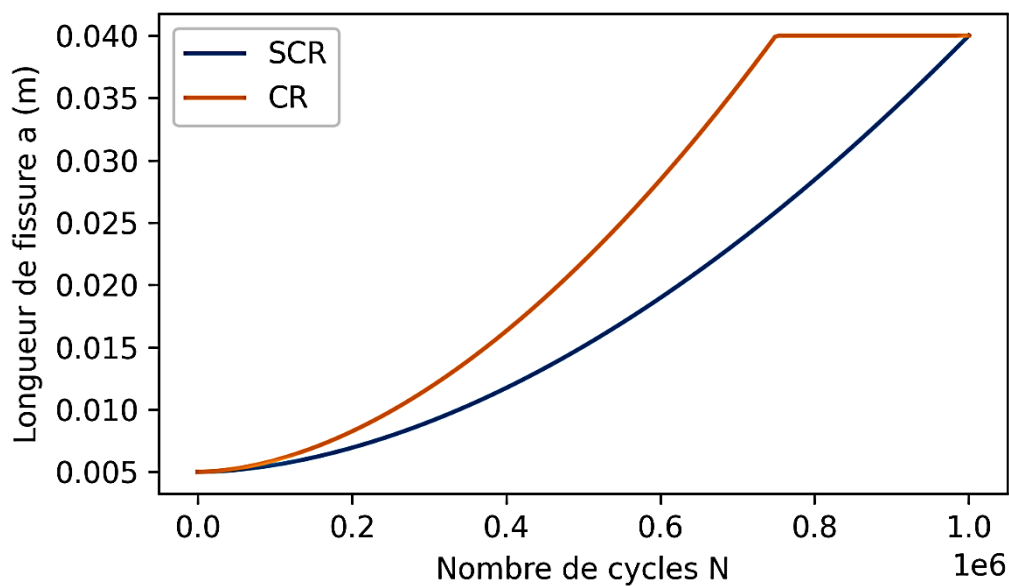


Figure 2.3 : Influence schématique des contraintes résiduelles sur la propagation de fissure.

3. Chargements cycliques à amplitude variable :

Un chargement à amplitude variable correspond à une succession de cycles pour lesquels les niveaux de contrainte évoluent au cours du temps. Contrairement au chargement à amplitude constante, il reproduit de manière plus réaliste les conditions de service rencontrées par la plupart des structures en exploitation.

Ce type de sollicitation peut prendre différentes formes, telles que des spectres aléatoires, des séquences périodiques, des surcharges ponctuelles, des sous-charges ou encore des blocs de chargement. Chacune de ces variations modifie la réponse du matériau et influence son comportement en fatigue.

Les changements d'amplitude engendrent des interactions entre les cycles successifs, ce qui peut entraîner des phénomènes d'accélération ou de retard de la propagation des fissures. Par conséquent, les dommages ne peuvent pas être évalués par une simple addition des effets de chaque cycle pris isolément.

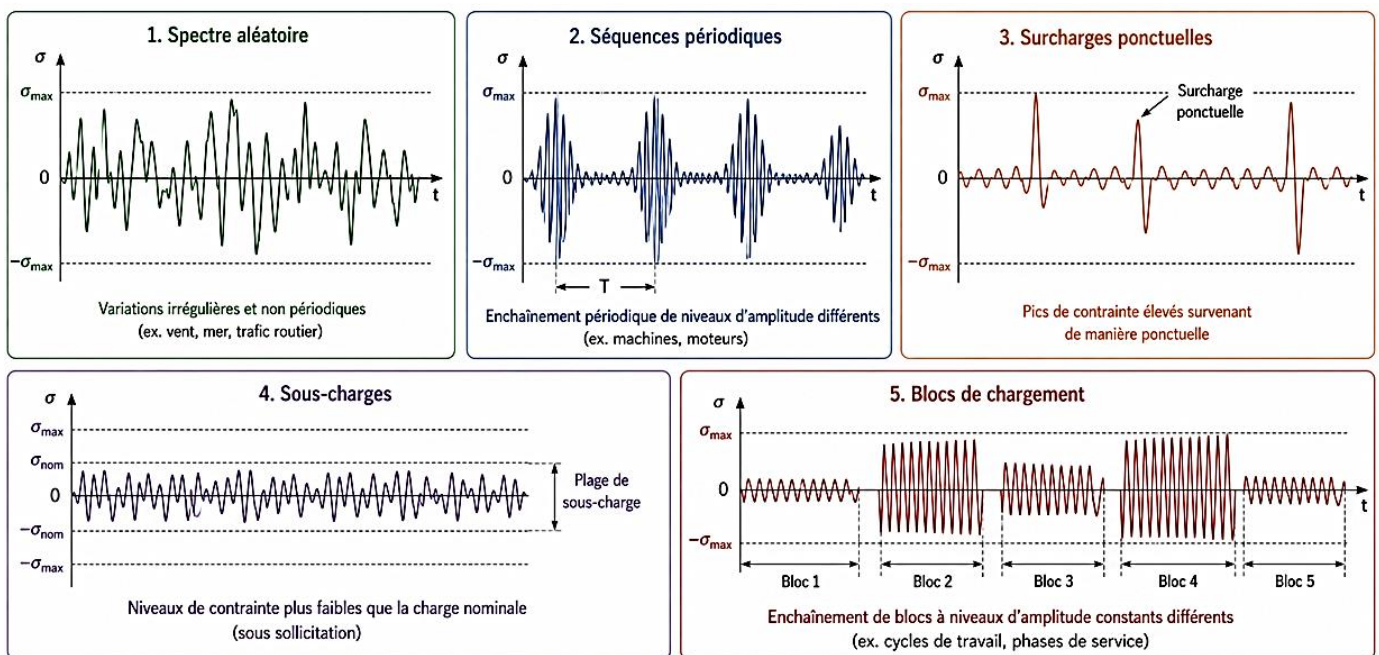


Figure 2.4 : Formes de chargement cycliques à amplitude variable

4 Blocs de chargement :

Les blocs de chargement correspondent à des séquences de cycles appliqués successivement à différents niveaux de contrainte, chaque niveau étant maintenu pendant un nombre déterminé de cycles. Cette méthode permet de représenter de manière simplifiée les variations de chargement rencontrées en service.

Dans un bloc croissant, le chargement débute à un faible niveau de contrainte puis augmente progressivement. Dans ce cas, la propagation de la fissure est généralement lente au début, avant de s'accélérer lorsque les niveaux de contrainte deviennent plus élevés.

À l'inverse, dans un bloc décroissant, les premiers cycles sont appliqués à forte amplitude, puis les niveaux de contrainte diminuent. Les charges initiales élevées peuvent engendrer une plasticité importante au voisinage du front de fissure, ce qui peut provoquer un ralentissement de la propagation lors des cycles suivants.

Ainsi, l'ordre d'application des blocs de chargement exerce une influence significative sur la vitesse de propagation des fissures et, par conséquent, sur la durée de vie en fatigue de la structure.

5 Interaction entre les contraintes résiduelles et blocs de chargement contraint :

La superposition des contraintes résiduelles de soudage et des effets de séquence liés aux blocs de chargement produit des interactions complexes sur la propagation des fissures. Lorsque les contraintes résiduelles sont de traction, elles augmentent R_{eff} , diminuent la fermeture de fissure et atténuent le retard de propagation habituellement observé après une surcharge. Le résultat est une accélération nette de la croissance et une réduction de la durée de vie. À l'inverse, des contraintes résiduelles de compression amplifient la fermeture de fissure, accentuent le retard de propagation et prolongent la durée de vie de la structure.

L'effet résultant est cependant conditionné par plusieurs paramètres : le niveau de contrainte appliquée, la longueur instantanée de la fissure et l'historique complet des chargements. Une modélisation rigoureuse doit donc intégrer simultanément ces différentes contributions pour produire des prédictions fiables de l'intégrité structurale des assemblages soudés.

CHAPITRE III :

Méthodologie de Prédiction & Données Expérimentales

1 Introduction :

Ce chapitre décrit l'approche adoptée pour prédire la progression des fissures dues à la fatigue, considérant une variété de facteurs influents, dont les conditions de charge, les caractéristiques mécaniques du matériau, la forme de la structure et la condition des contraintes résiduelles.

Cette méthode est employée par l'utilisation du code AFGROW, ce qui permet de réaliser une analyse fidèle et représentative du comportement en fatigue des structures analysées.

2 Code AFGROW :

AFGROW est un outil logiciel dédié à l'analyse de la propagation des fissures et à l'estimation de la longévité des structures face à la fatigue. Il considère les charges imposées et les contraintes résiduelles, y compris celles attribuables au soudage. En utilisant ses outils de simulation, ses bibliothèques de matériaux et l'intégration de données expérimentales, il offre la possibilité de modéliser diverses situations de fatigue et de présenter les résultats sous la forme de graphiques détaillant la progression des fissures et leur rythme de propagation.

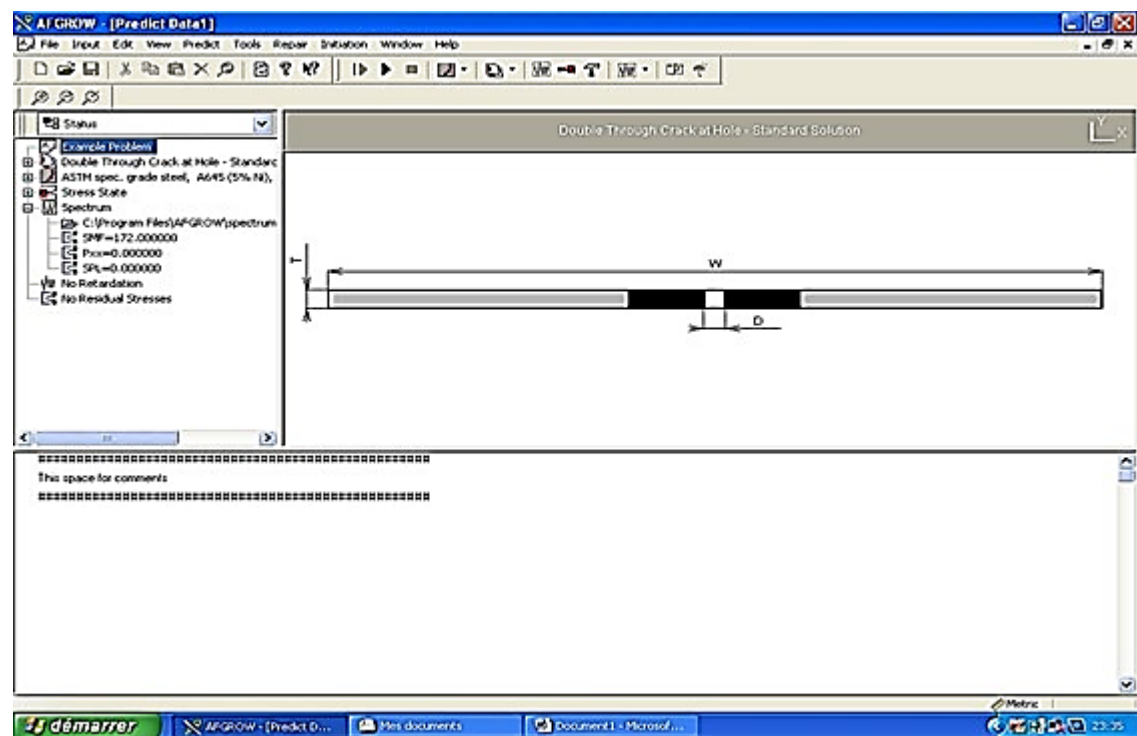


Figure3. 1: Interface géométrie [46]

Tabular LOOKUP Data

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

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

		R[1]	R[2]	R[3]	R[4]
da/dN[1]	2.90e-010	0.05	0.4	0.7	0.9
da/dN[2]	5.88e-010	6.6	4.4	3.18	2.73
da/dN[3]	1.00e-009	6.7	4.5	3.4	3.3
da/dN[4]	6.76e-009	7.5	5	4.3	4.1
da/dN[5]	8.73e-009	8.1	6.3	5.4	5.1
da/dN[6]	8.73e-009	10	8.1	7.1	6.8

Material name: Pipeline_X70

Ultimate Strength: 672.9 Young's Modulus: 200000

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

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

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

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

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

OK Cancel Save Read Apply

Figure3. 2: Interface matériau [46]

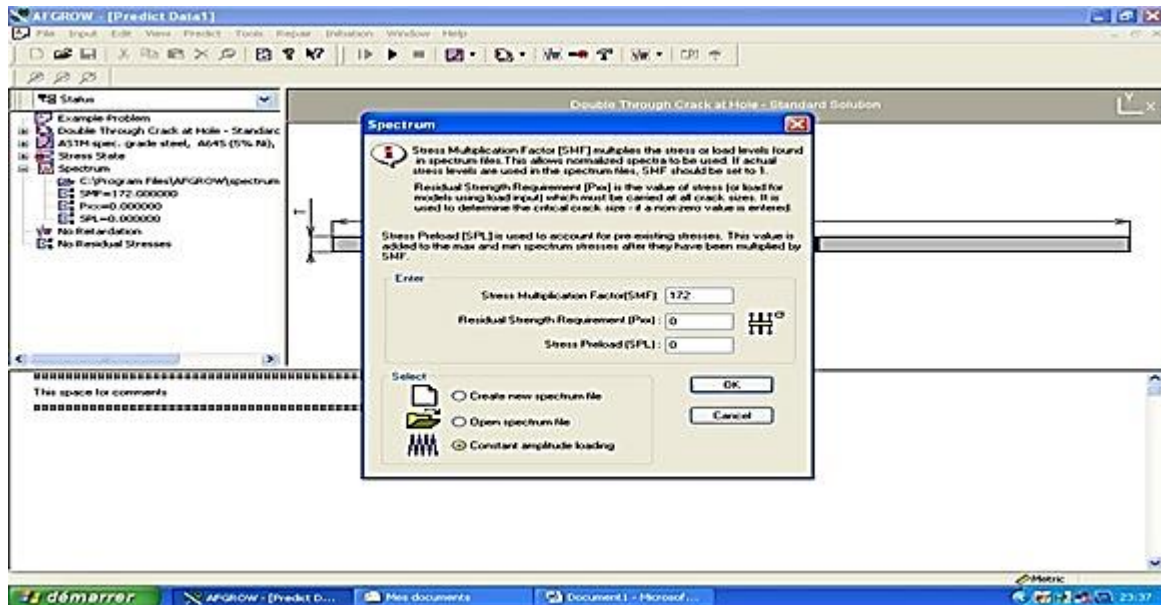


Figure3. 3 : interface chargement cyclique [46]

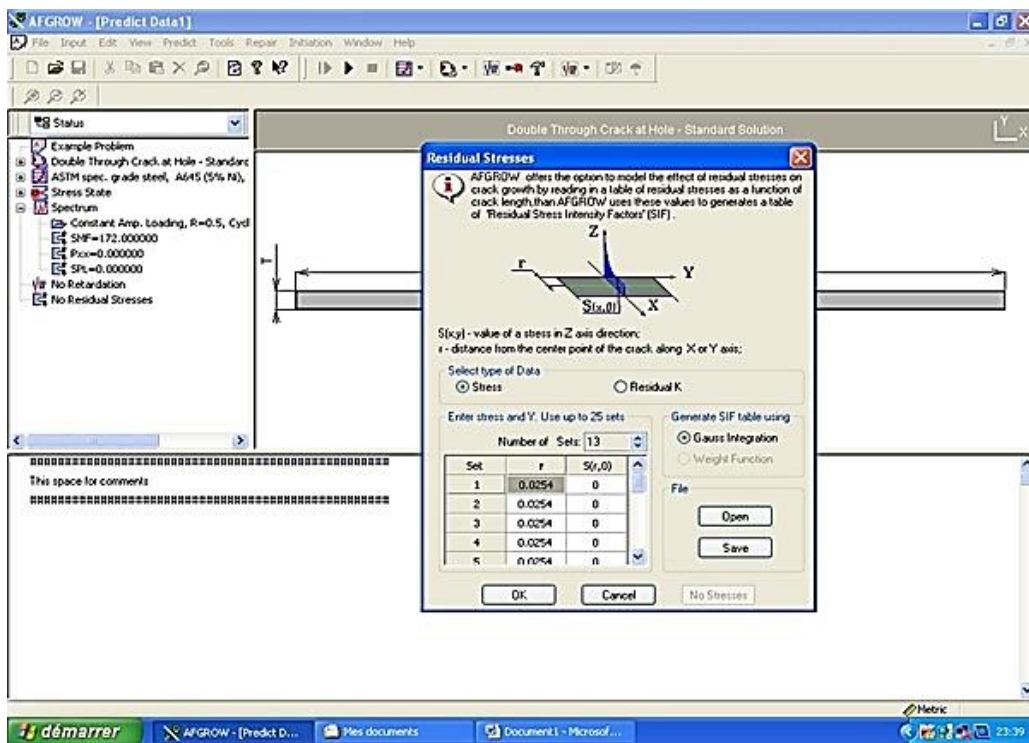


Figure3. 4: Interface contraintes résiduelles [46]

2.1 Modèle de Willenborg :

Le modèle de Willenborg est une approche analytique utilisée pour représenter l'influence des surcharges sur la propagation des fissures soumises à un chargement de fatigue. Son objectif principal est de reproduire le phénomène de retard de propagation observé après l'application d'une surcharge, phénomène directement lié à la création d'une zone plastique à proximité de la pointe de fissure.

Cette méthode est largement utilisée dans le logiciel AFGROW afin d'améliorer la précision des estimations de durée de vie lorsque les structures sont soumises à des historiques de chargement complexes et variables.

Loi de base utilisée

La propagation des fissures est initialement décrite par la loi de **Paris-Erdogan** :

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

- $\frac{da}{dN}$: vitesse de propagation de la fissure
- C et m : constants matériaux

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

Le modèle introduit un **facteur de correction** F qui dépend des charges précédentes :

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \cdot F \quad (3.3)$$

Avec :

F < 1 retard (après surcharge)

F > 1 accélération (après sous-charge)

Le modèle agit donc directement sur la vitesse de propagation.

Le modèle de Willenborg introduit un facteur de ralentissement de la propagation des fissures en définissant un rapport de charge effectif **R_{eff}** au niveau de la pointe de fissure. Il prend en compte l'effet des surcharges via la modification du champ de contraintes liée à la zone plastique. Cette approche permet de modéliser le ralentissement temporaire de la propagation, tel qu'implémenté dans le code AFGROW.

$$R_{eff} = \frac{K_{min\,eff}}{K_{max\,eff}} \quad (3.4)$$

Avec

$$K_{min\,eff} = K_{min} - K_r \quad (3.5)$$

$$K_{max\,eff} = K_{max} - K_r \quad (3.6)$$

Le facteur d'intensité de contrainte résiduelle K_r est défini pour une longueur de fissure a correspondant à la formation d'une zone plastique en pointe de fissure. Il traduit l'influence des contraintes résiduelles induites par une surcharge sur le champ de contraintes local. Ce paramètre joue un rôle clé dans la modélisation du retard de propagation des fissures, notamment dans le modèle de Willenborg.

3 Géométrie et matériau d'étude :

3.1 Modèle géométrique :

La géométrie retenue pour l'analyse correspond à une plaque de 4 mm d'épaisseur modélisée sous AFGROW. Cette plaque comporte un trou central de diamètre égal à 3 mm, localisé au niveau de la ligne de fusion dans le cas d'un assemblage soudé.

Deux fissures initiales sont introduites de part et d'autre de ce trou. Leur longueur varie entre 5 mm et 10 mm selon les configurations étudiées. Cette modélisation permet de représenter de manière réaliste les zones critiques où se développent les phénomènes d'amorçage et de propagation des fissures, en particulier dans les régions soumises à de fortes concentrations de contraintes et à la présence de contraintes résiduelles issues du soudage.

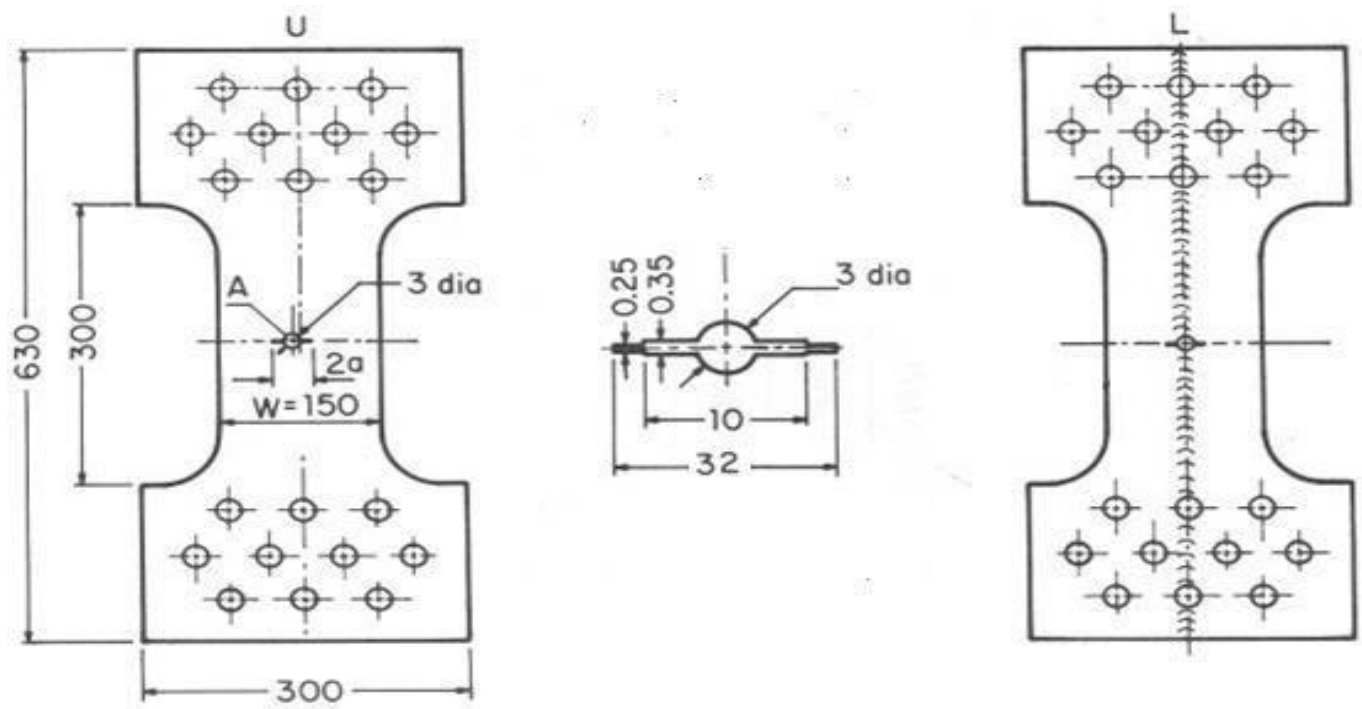


Figure 3. 5: modèles géométriques des éprouvettes soudées et non soudées [47]

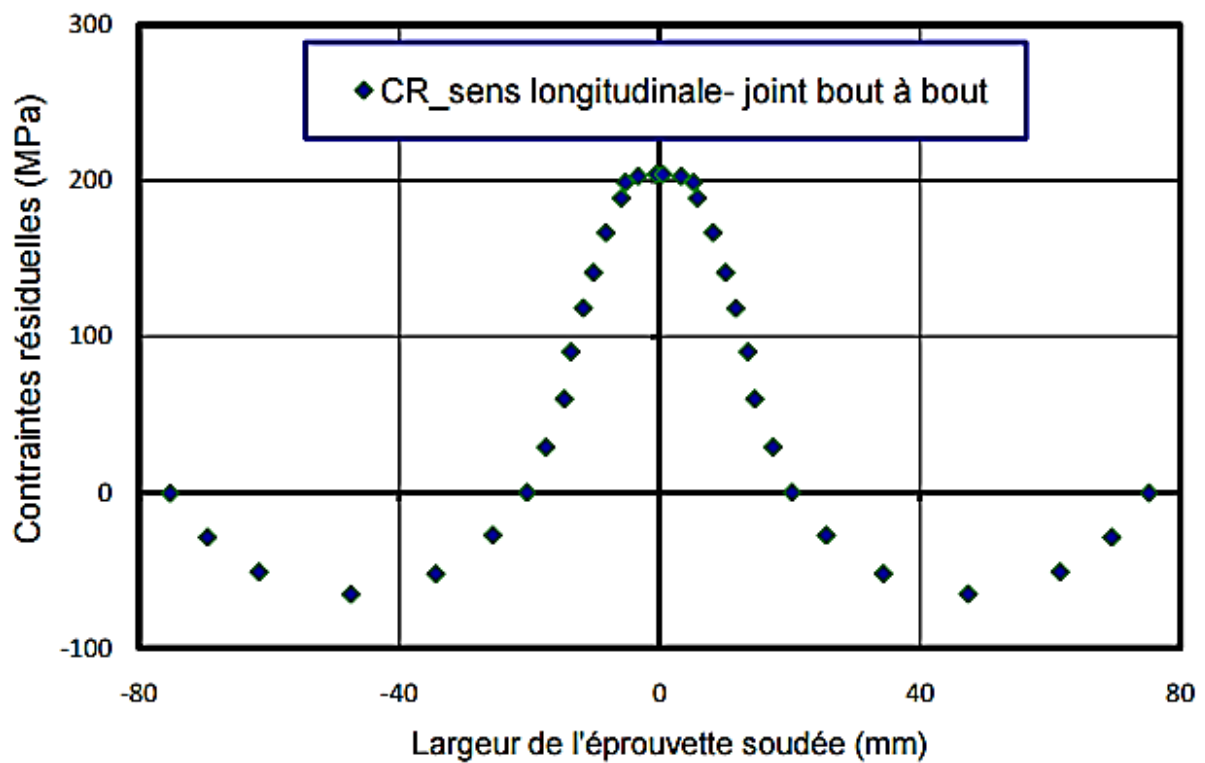


Figure3. 6: Evolution du Contraintes résiduelles en fonction de Largeur de l'éprouvette soudée (mm)

3.2 Matériau d'étude :

Le matériau sélectionné pour cette étude est l'acier ASTM A645 Grade 45, correspondant à l'acier 18G2AV selon la normalisation polonaise[47] . Sa composition chimique ainsi que ses caractéristiques mécaniques sont présentées dans les tableaux correspondants.

Les paramètres du modèle NASGRO utilisés pour la simulation de la propagation des fissures sont également répertoriés. Ces données permettent de décrire avec précision le comportement en fatigue du matériau et d'assurer la fiabilité des prédictions réalisées à l'aide du logiciel.

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

Tableau 3. 1: Composition chimique

E (GPa)	σ_y (MPa)	UTS (MPa)	K_{Ic} (MPa.Sqrt(m))	K_{Ic} (MPa.Sqrt(m))	ν
206	517.11	795	197.79	296.69	0.3

Tableau 3. 2: Propriétés mécanique

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

Tableau 3. 3: Paramètres de l'équation NASGRO

CHAPITRE IV :

Résultats & Discussion

1. Effet du rapport de charge "R" :

L'effet du rapport "R" sur le nombre de cycles "N" et la vitesse da/dN est montré respectivement par les figures 4.1 et 4.2.

La figure 4.1 montre l'évolution de la longueur de fissure a en fonction du nombre de cycles N sous $\sigma_{\max}=172$ MPa. L'augmentation du rapport de charge influence fortement la durée de vie : pour $R=0.1$ la taille critique d'environ 0.045 mm est atteinte vers 150 000 cycles, tandis que pour $R=0.5$ la durée de vie dépasse 500 000 cycles, en raison de la diminution de $\Delta\sigma$. Les courbes présentent une concavité positive, traduisant une accélération de la propagation avec l'augmentation de " a ".

Pour $R=0.3$ l'effet des contraintes résiduelles est notable : sans contraintes résiduelles (SCR), la durée de vie atteint environ 290 000 cycles contre 240 000 cycles avec contraintes résiduelles (CR), montrant que ces dernières accélèrent la propagation. Ainsi, la réduction des contraintes résiduelles et le contrôle de "R" permettent d'améliorer significativement la tenue en fatigue.

La figure 4.2 présente l'évolution de la vitesse de propagation des fissures de fatigue da/dN en fonction de la longueur de fissure " a ", pour des rapports de charge $R=0.1$, 0.3 et 0.5 sous une contrainte maximale constante $\sigma_{\max}=172$ MPa. L'analyse met en évidence que l'augmentation de R entraîne une diminution de la vitesse de propagation, en raison de la réduction de l'amplitude de contrainte $\Delta\sigma=\sigma_{\max}(1-R)$ ce qui limite l'énergie disponible en pointe de fissure. Par ailleurs, Pour $R=0.3$ la comparaison entre les cas avec contraintes résiduelles (CR) et sans contraintes résiduelles (SCR) montre que, pour $a<0.02$ m la propagation est plus lente sans contraintes résiduelles, indiquant que les contraintes de traction favorisent l'amorçage. Un croisement apparaît vers $a=0.03$ m au-delà duquel la propagation devient légèrement plus rapide sans contraintes résiduelles, traduisant une atténuation de leur effet avec l'augmentation de la fissure.

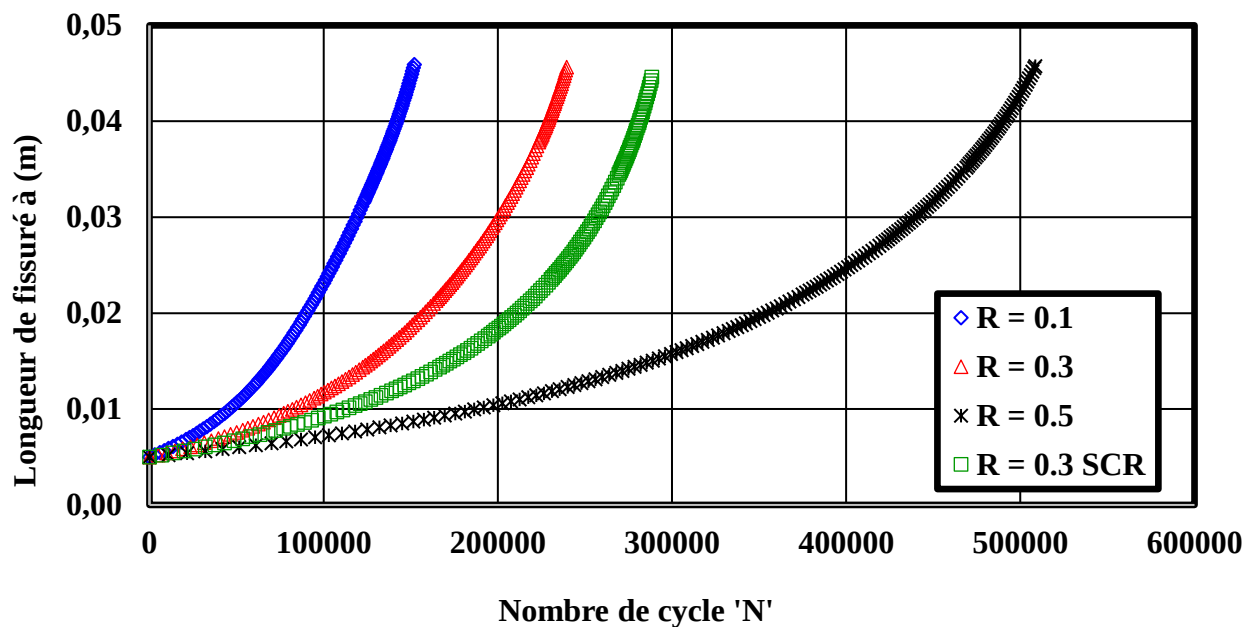


Figure 4. 1 : Effet du rapport "R" sur le nombre de cycles en fatigue pour $\sigma = 172\text{MPa}$

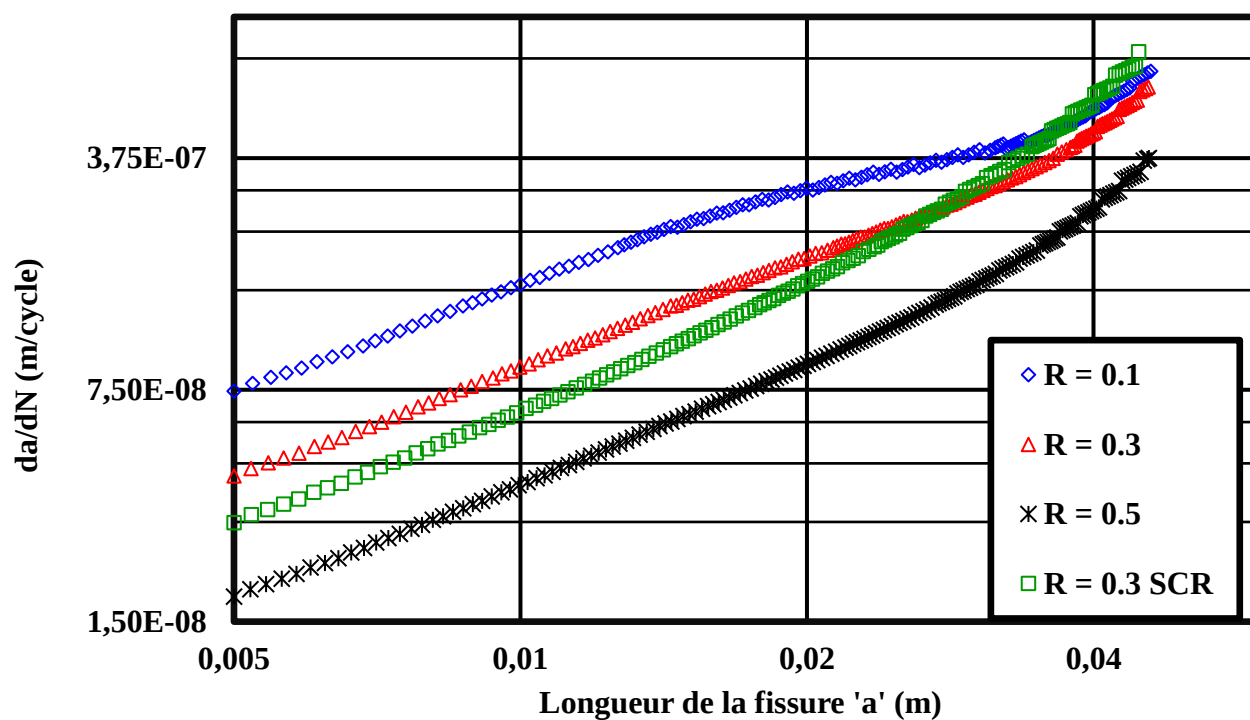


Figure 4. 2: Effet du rapport "R" sur la vitesse de fissuration pour $\sigma = 172\text{MPa}$

La figure 4.3 présente la relation da/dN en fonction de ΔK en coordonnées log–log, mettant en évidence l’influence du rapport de charge R . Pour les cas avec contraintes résiduelles (CR), les courbes correspondant à $R = 0.1, 0.3, 0.5$ tendent à converger pour des ΔK élevés, à ΔK constant, l’augmentation de R entraîne une légère hausse de da/dN due à la réduction de la fermeture des fissures.

La comparaison entre $R = 0.3$ en CR et en SCR montre que la courbe SCR présente des vitesses de propagation plus élevées pour un même ΔK . Cela indique que les contraintes résiduelles compressives en CR réduisent l’intensité effective (ΔK_{eff}) et ralentissent la propagation.

La figure 4.4 présente l’évolution du rapport de charge effectif R_{eff} en fonction de la longueur de fissure "a" pour $R = (0.1, 0.3 \text{ et } 0.5)$ avec et sans contraintes résiduelles. En présence de contraintes résiduelles, R_{eff} diminue quasi linéairement avec l’augmentation de "a", en raison de la redistribution et de la relaxation des contraintes en pointe de fissure. En revanche, sans contraintes résiduelles (SCR), la courbe pour $R=0.3$ reste constante traduisant un comportement gouverné uniquement par le chargement externe.

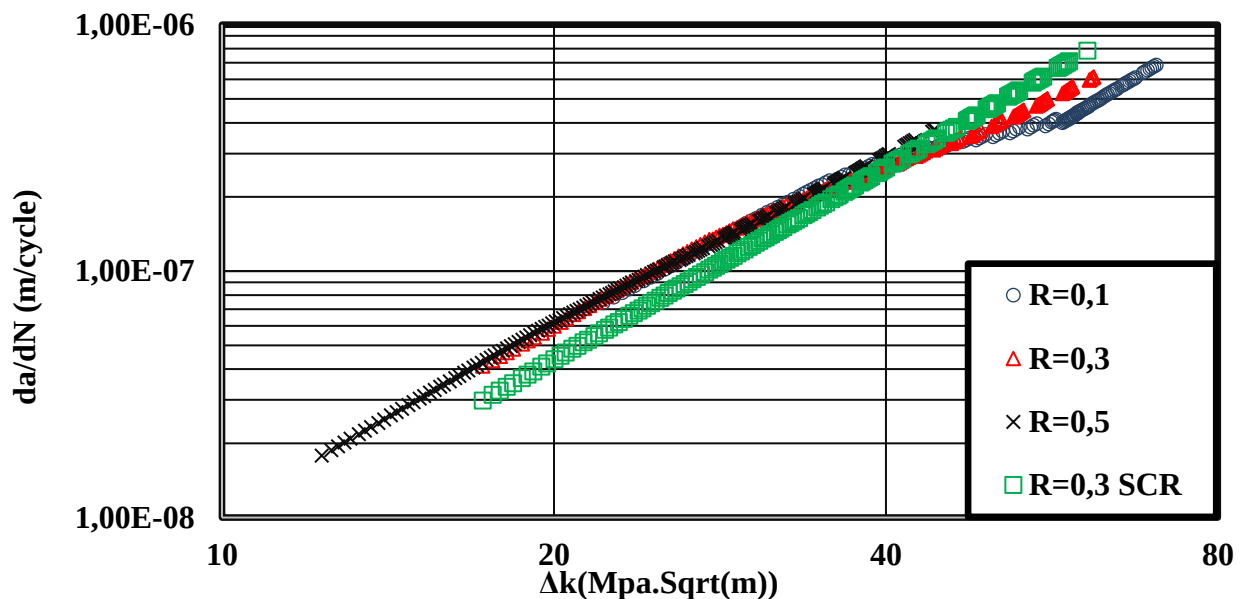


Figure 4.3 : Effet du rapport de charge R sur la propagation des fissures pour $\sigma=172\text{MPa}$

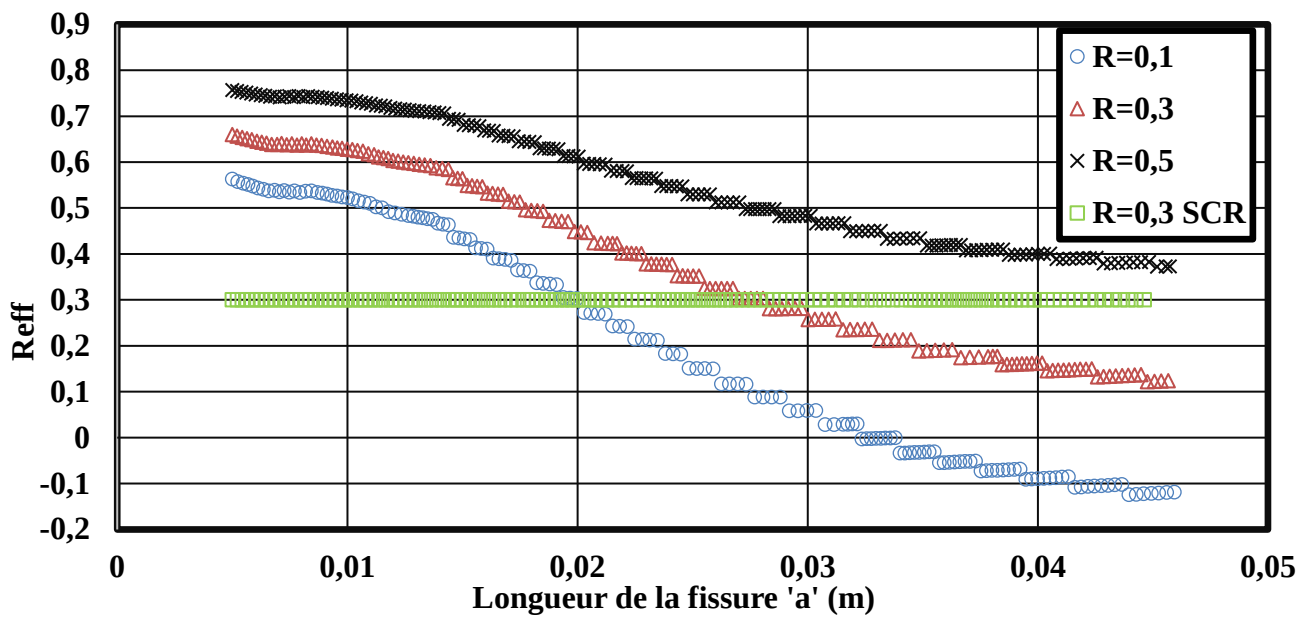


Figure 4.4 : Effet du rapport effectif R_{eff} en fonction de "a" pour $\sigma=172\text{MPa}$

2. Effet du bloc de chargement :

La figure 4.5 présentée un spectre (de $\sigma_1=172\text{ MPa}$ et $\sigma_2=206.4\text{ MPa}$) conduisant à la rupture vers 1.7×10^5 cycles.

La figure 4.6 présentée un spectre (de $\sigma_1=206.4\text{ MPa}$ et $\sigma_2=172\text{ MPa}$) avec une rupture plus précoce autour de 165 113 cycles.

La figure 4.7 présentée un spectre complexe $\sigma_1=172\text{ MPa}$ $\sigma_2=206.4\text{ MPa}$ $\sigma_1=172\text{ MPa}$ (Type 5 000 / 10 000 / 5 000 cycles) permettant d'étudier l'interaction entre variations d'amplitude, plasticité cyclique et contraintes résiduelles.

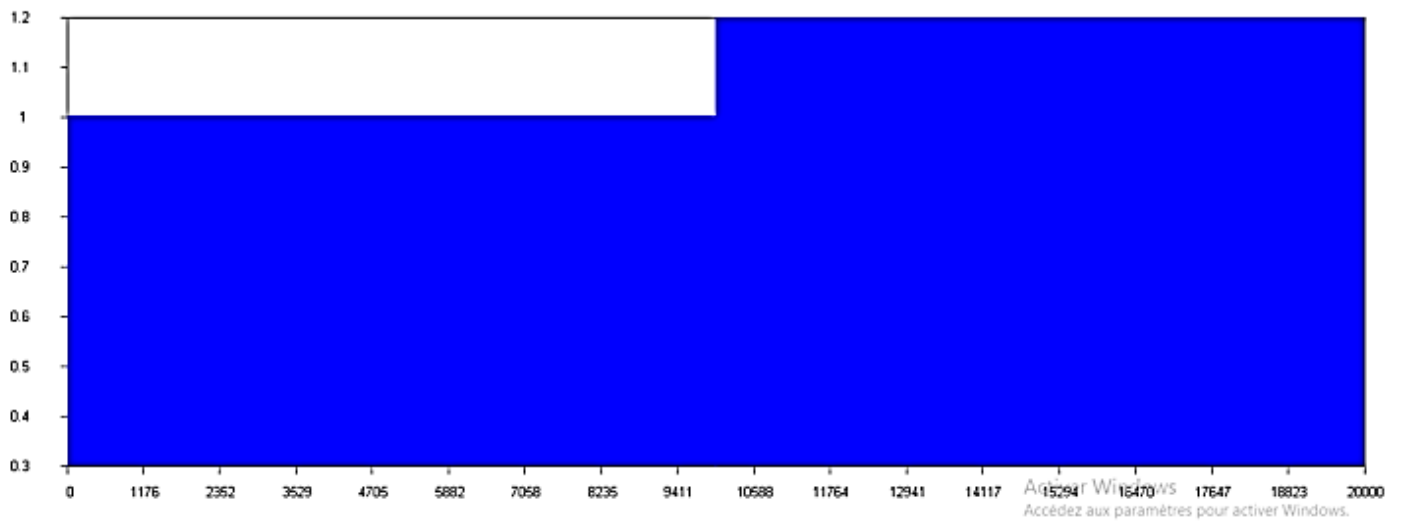


Figure 4.5 : Chargement variable pour $R=0.3$ et ($\sigma_1=172$ MPa $\sigma_2=206.4$ MPa)

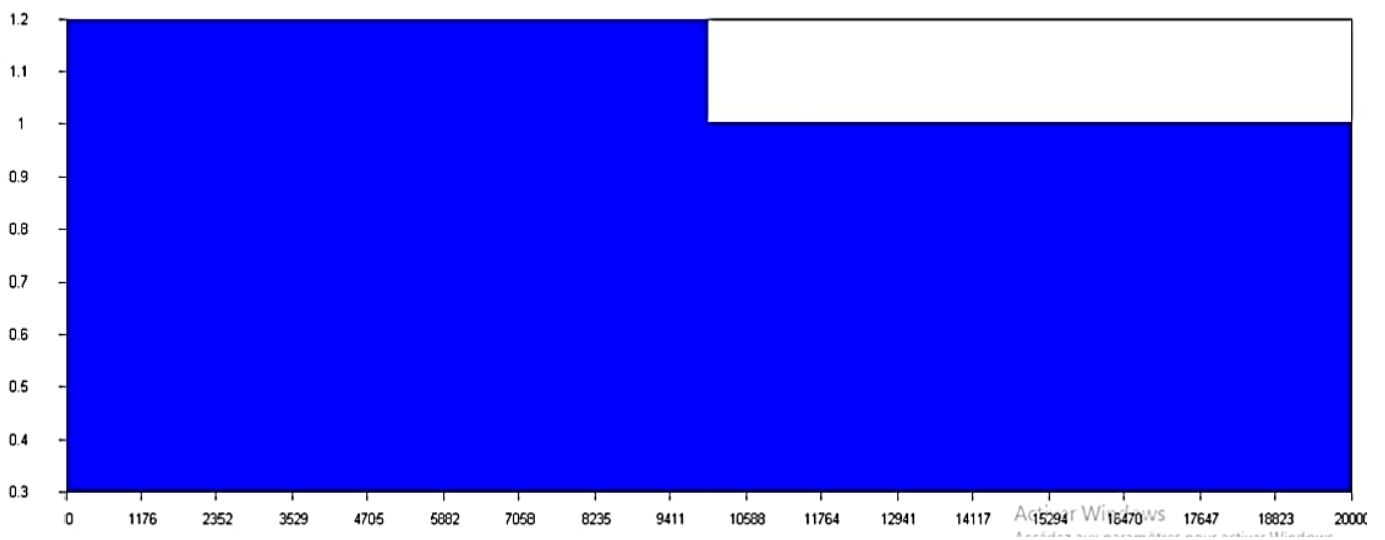


Figure 4.6 : Chargement variable pour $R=0.3$ et ($\sigma_1=206.4$ MPa $\sigma_2=172$ MPa)

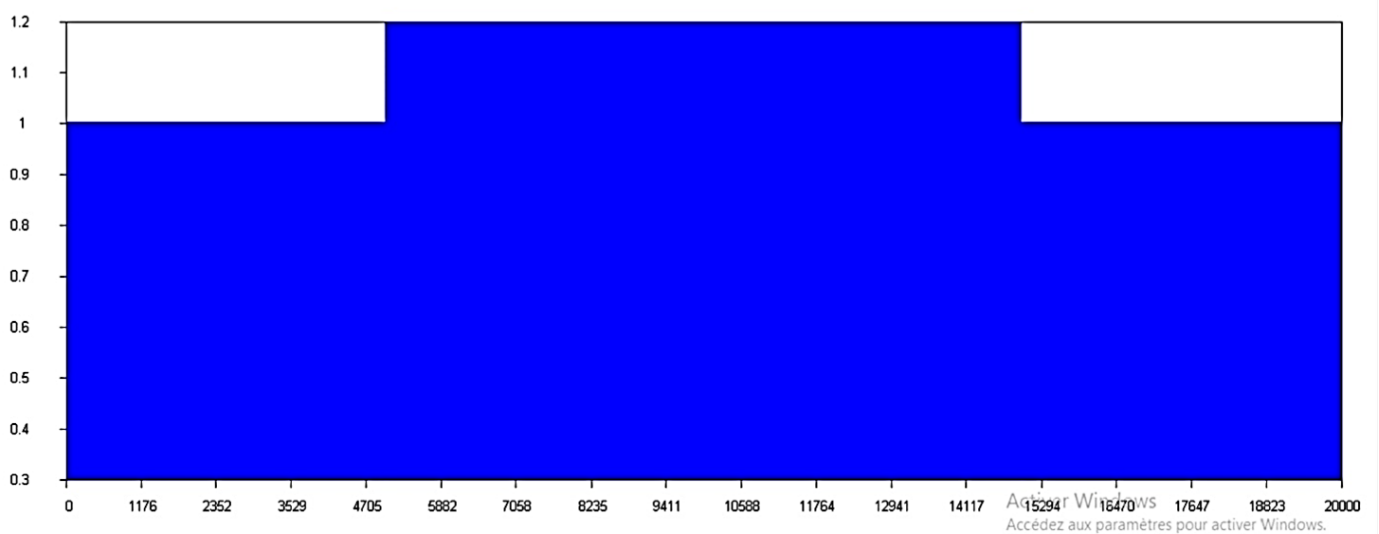


Figure 4.7 : Chargement variable pour $R=0.3$ et ($\sigma_1=172$ MPa $\sigma_2=206.4$ MPa $\sigma_1=172$ MPa)

La figure 4.8 présente l'évolution de la longueur de fissure "a" en fonction du nombre de cycles "N" pour trois séquences de chargement alternant deux niveaux de contrainte maximale ($S=172$ et 206.4MPa) à $R=0.3$

Globalement, les trois courbes montrent une augmentation de "a" avec une pente croissante, traduisant l'accélération de la propagation de fissure liée à l'augmentation progressive de ΔK . Les trajectoires convergent vers une longueur critique proche de 0.04mm

La figure 4.9 présente l'évolution du taux de propagation de fissure da/dN en fonction de la longueur "a" pour trois chargements cycliques. Les trois courbes montrent une tendance globale croissante, conforme à la loi de Paris, où da/dN augmente avec "a" en raison de l'augmentation du facteur d'intensité de contrainte.

Des chutes cycliques de da/dN apparaissent, traduisant un phénomène de retard. Elles sont liées aux variations de contrainte entre 172 et 206.4 MP , qui génèrent une zone plastique en pointe de fissure. Cette zone induit des contraintes de fermeture, réduisant temporairement ΔK_{eff} et ralentissant la propagation.

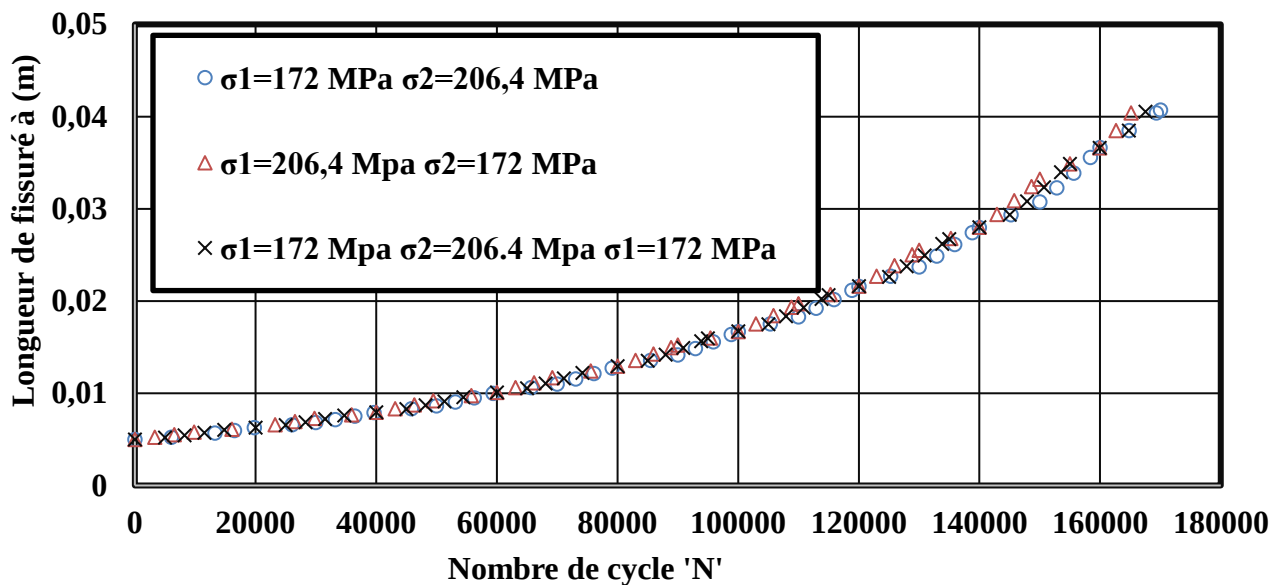


Figure 4.8 Effet de block de chargement cycles "N" la longueur de fissure "a" en fonction du nombre de cycle N

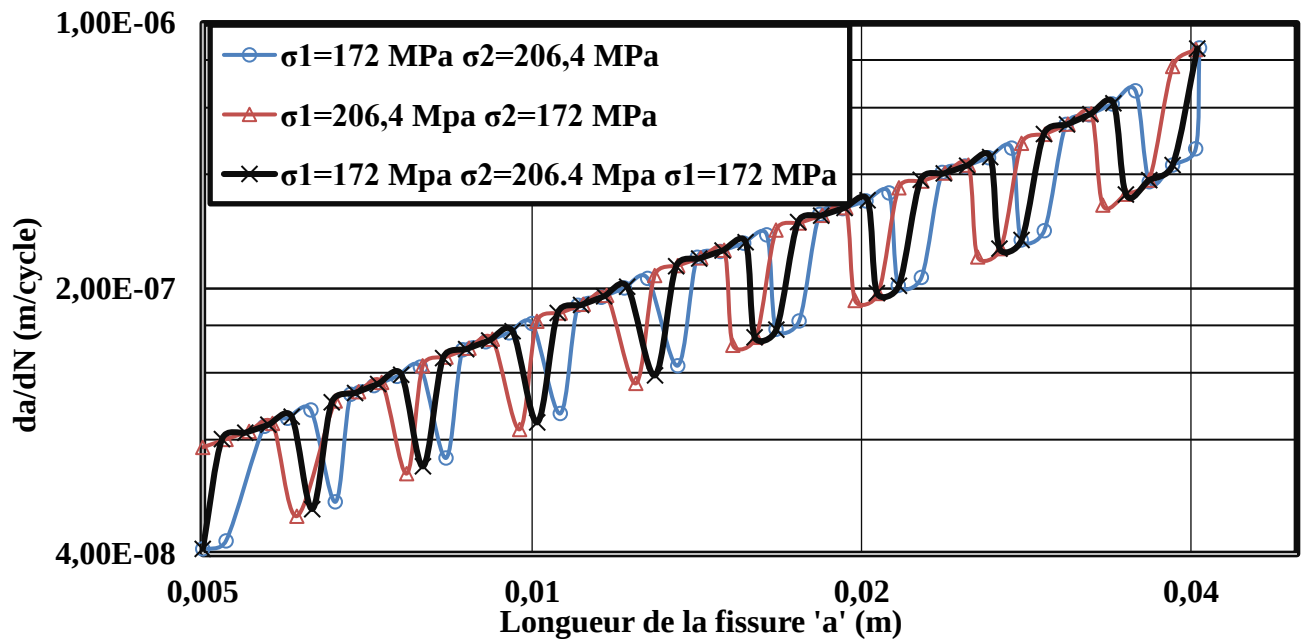


Figure 4.9 Effet de block de chargement du taux de propagation de fissure da/dN en fonction de la longueur "a"

La figure 4.10 représente l'évolution de la vitesse de propagation de fissure da/dN en fonction de ΔK , en échelle log-log. La linéarité observée confirme la validité de la loi de Paris :

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

où C et m sont des constantes du matériau.

Les différentes séries de données (issues des chargements $S=172$ et 206.4 MPA) superposent presque parfaitement, montrant que, pour un même ΔK , la vitesse de propagation est indépendante de la séquence de chargement.

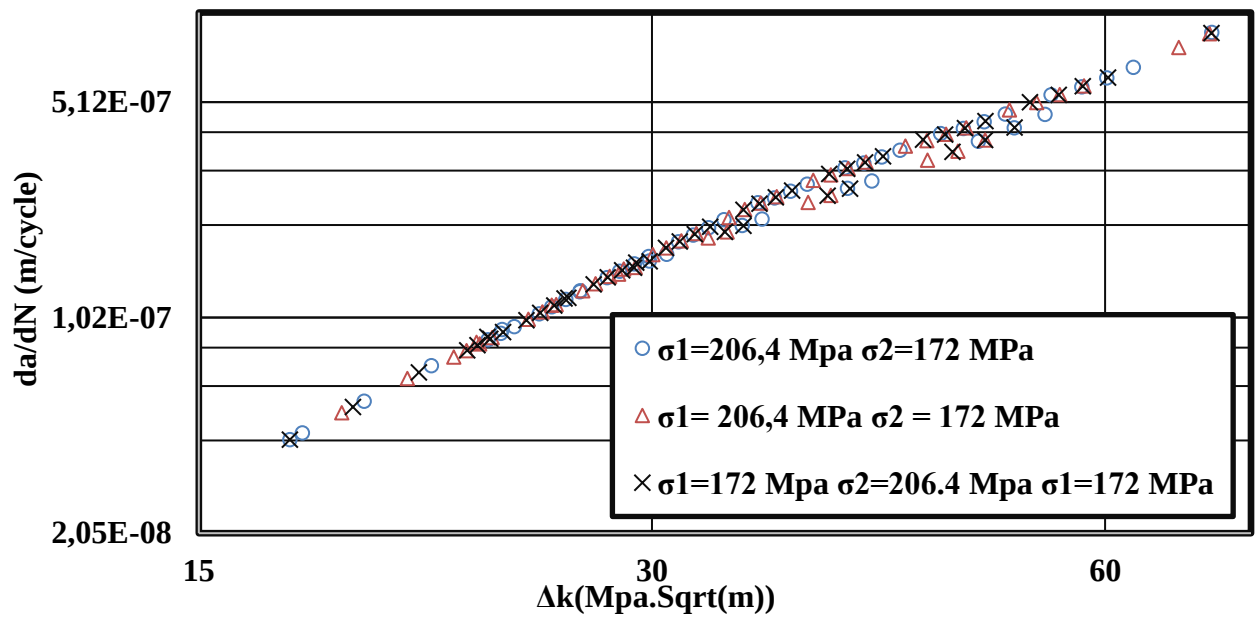


Figure 4.10 Effet de block de chargement de la vitesse de propagation de fissure da/dN en fonction de ΔK

La figure 4.11 montre l'évolution de R_{eff} fonction de la longueur de fissure "a" pour trois chargements ($\sigma_1=172$ et $\sigma_2=206.4$ MPa). Les trois courbes présentent une décroissance globale de R_{eff} avec "a", liée à l'augmentation de la zone plastique et à l'effet de fermeture de fissure qui réduit la contrainte effective.

Des oscillations apparaissent, traduisant des phénomènes de fermeture de fissure et des effets transitoires lors des changements de chargement. Les trois conditions montrent un comportement similaire, avec de légers décalages :

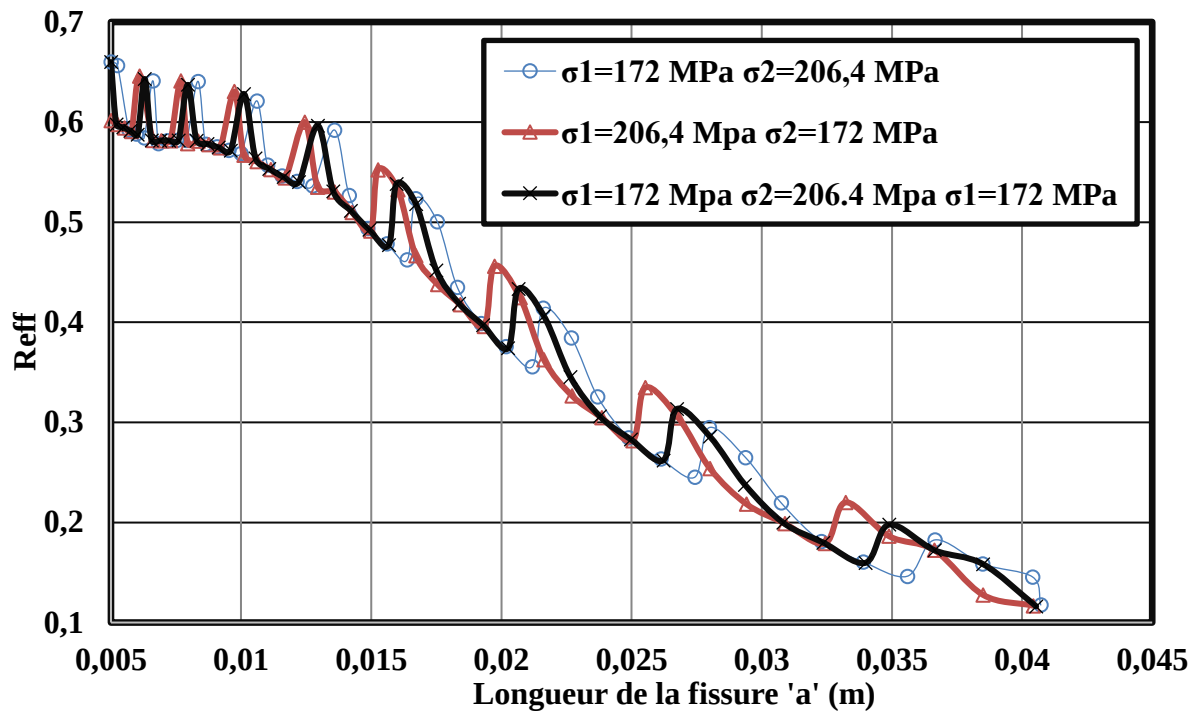


Figure 4.11 Effet de block de chargement de R_{eff} fonction de la longueur de fissure "a"

3. Effet de l'amplitude de chargement :

La figure 4.12 ($a = f(N)$) met en évidence la propagation des fissures sous contraintes résiduelles pour ($R = 0.3$). L'augmentation de la contrainte (S) réduit fortement la durée de vie : elle passe d'environ (290.000) cycles à ($S = 160$) MPa à près de (170.000) cycles à ($S = 196$) MPa, soit une baisse d'environ (40%) pour une hausse de (22%) de la contrainte, traduisant une forte non-linéarité du phénomène de fatigue.

La longueur critique diminue avec (S) : environ 0.048 m à (160) MPa contre 0.042 m à (196) MPa, la rupture survenant lorsque $K_{max} = K_r$

La Figure 4.13 représente la vitesse de propagation des fissures da/dN en fonction de la longueur a en échelle logarithmique. La quasi-linéarité des courbes indique que la propagation se situe dans le régime II de fatigue

L'influence de la contrainte S est marquée : pour une même longueur de fissure ($a \approx 0.016$ m), l'augmentation de S de 160 MPa à 196 MPa entraîne une hausse significative de da/dN , en raison de l'augmentation de ΔK .

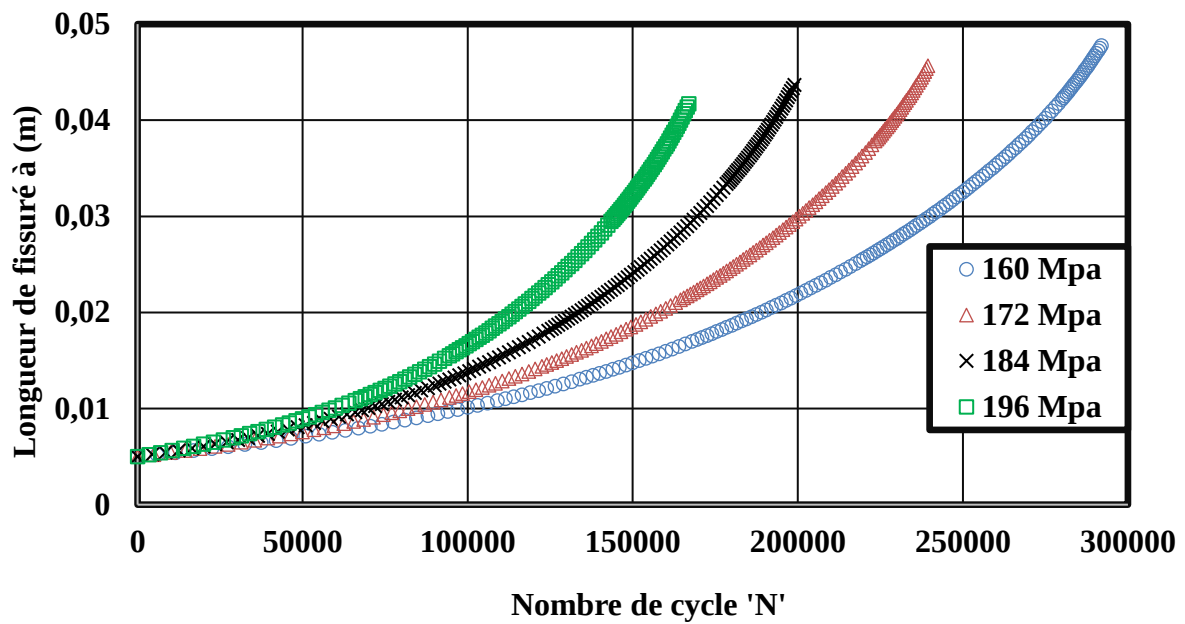


Figure 4.12 Effet de l'amplitude de chargement sur la durée de vie pour $R = 0.3$

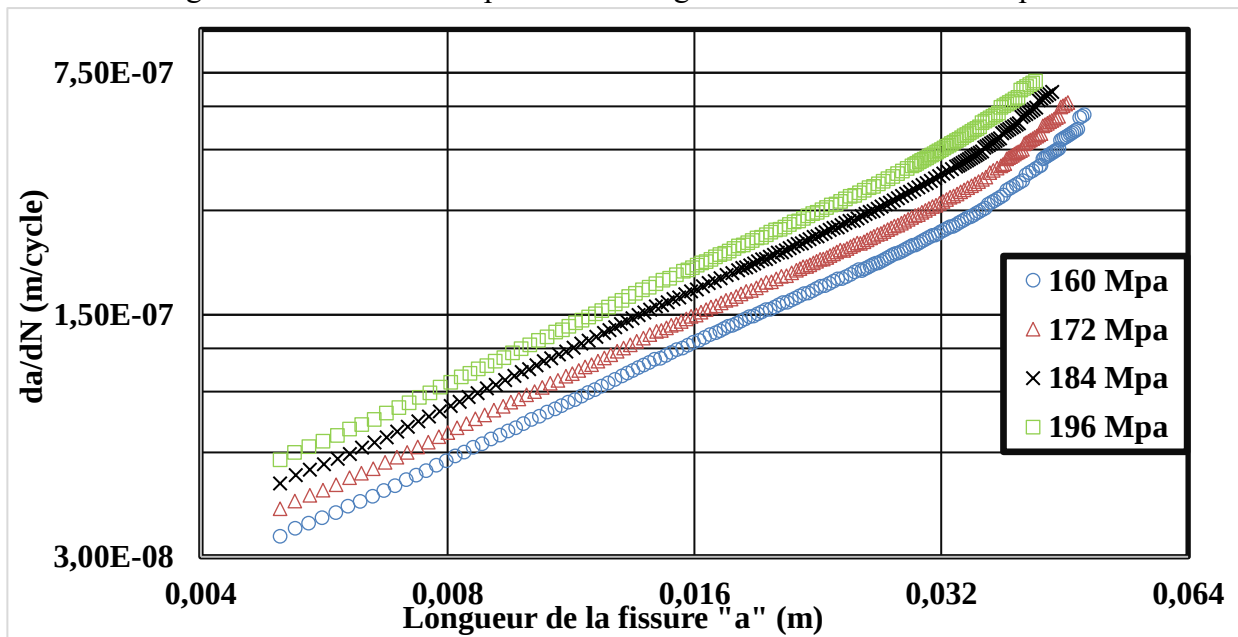


Figure 4.13 : Effet de l'amplitude de chargement sur la vitesse de fissuration pour $R = 0.3$

La Figure 4.14 montre la relation entre la vitesse de propagation des fissures da/dN et ΔK , en validant la cohérence du modèle. La quasi-superposition des courbes pour 160 MPa à 196 MPa confirme que la propagation dépend principalement de ΔK et non de la contrainte nominale.

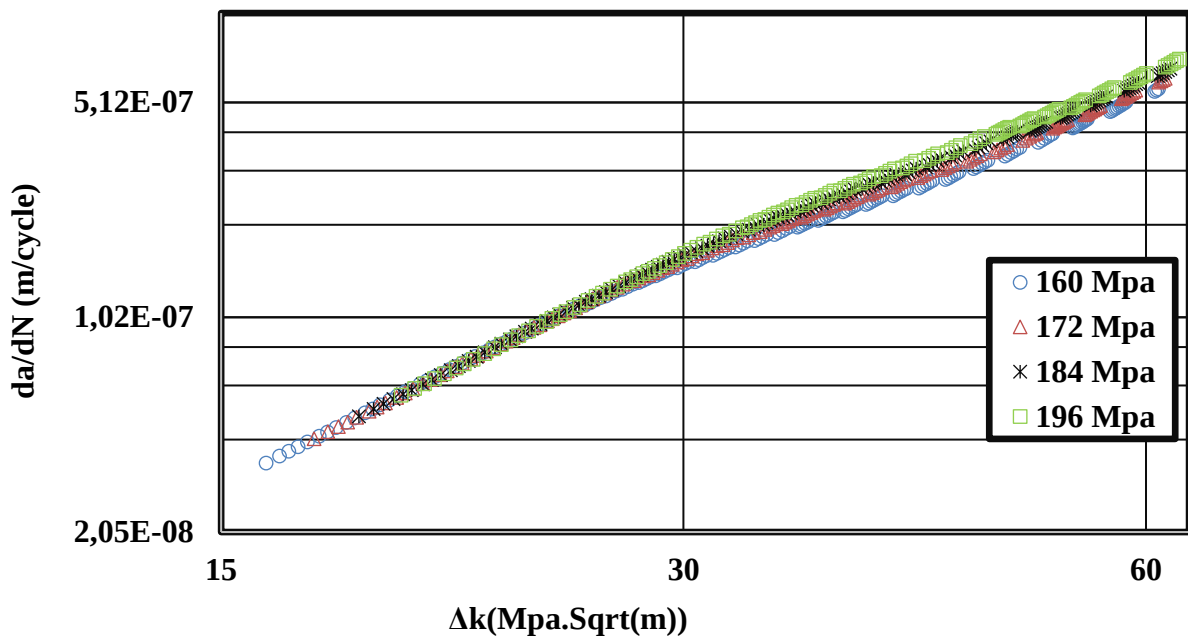


Figure 4.14 Effet de chargement la vitesse de propagation des fissures da/dN et ΔK

La Figure 4.15 L'évolution du rapport de charge effectif R_{eff} en fonction de la longueur de fissure "a" mettant en évidence l'interaction entre le chargement cyclique et les contraintes résiduelles de soudage. Malgré un rapport nominal fixé à $R = 0.3$, les valeurs initiales de R_{eff} comprises entre 0.64 et 0.68 pour $a < 0.01$ m indiquent la présence de contraintes résiduelles de traction, augmentant K_{min} effectif et favorisant une ouverture précoce de la fissure, donc une sollicitation plus sévère.

Au-delà de $a = 0.03$ m, R_{eff} diminue progressivement jusqu'à environ 0.1, passant sous la valeur nominale. Cette évolution traduit le passage vers une zone dominée par des contraintes résiduelles compressives, qui renforcent la fermeture de fissure et réduisent la force motrice.

L'influence de la contrainte appliquée S est notable : l'écart entre R_{eff} et R est plus marqué pour $S = 160$ MPa, pour $S = 196$ MPa, l'effet des contraintes résiduelles devient moins dominant, le comportement étant davantage contrôlé par le chargement externe.

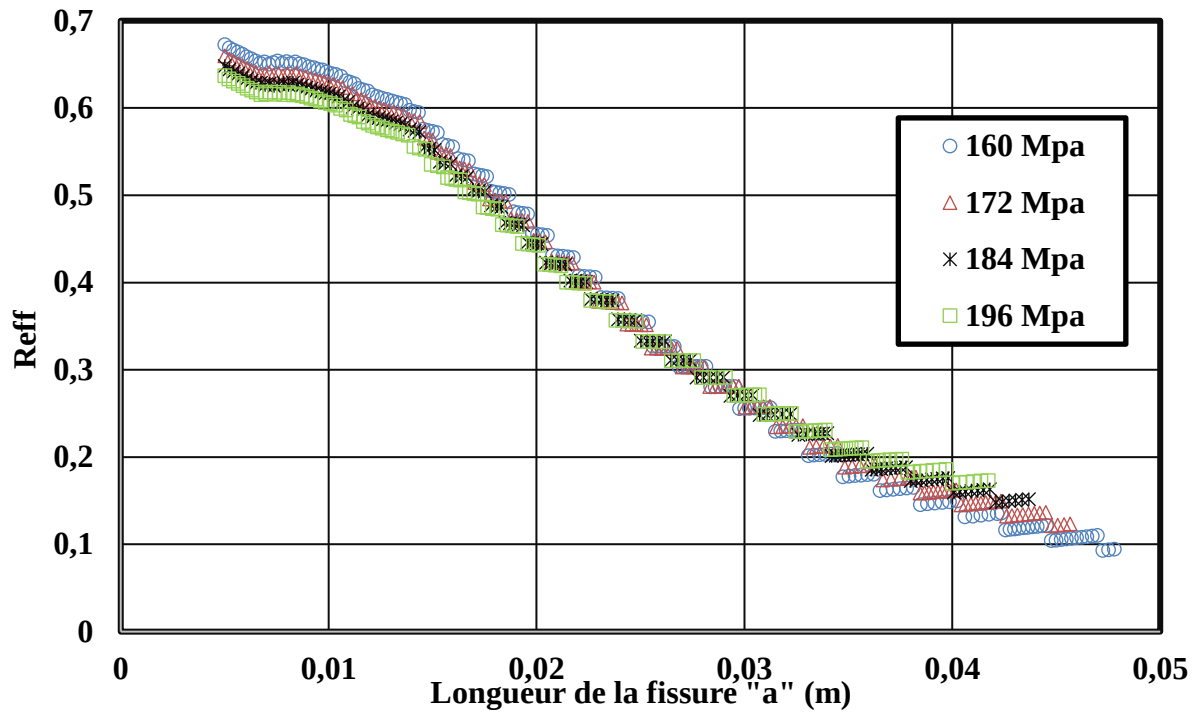


Figure 4.15 Effet de block de chargement de R_{eff} en fonction de la longueur de fissure "a"

La figure 4.16 présente l'évolution du facteur d'intensité de contrainte résiduel K_r en fonction de la longueur de fissure a , révélant un comportement biphasique.

Pour $a < 0,027$ m, K_r est positif, avec un maximum d'environ 30 MPa vers $a \approx 0,01$ m, puis une décroissance progressive. Cette zone de contraintes résiduelles de traction augmente K_{max} et R_{eff} , réduit la fermeture de fissure et accroît ΔK_{eff} , ce qui accélère la propagation de fissure.

Un point critique apparaît vers $a \approx 0,027$ m, où $K_r = 0$, marquant la transition entre deux régimes. Au-delà, K_r devient négatif et atteint environ -15 MPa pour $a \approx 0,04$ m, indiquant une zone de contraintes résiduelles de compression. Celles-ci favorisent la fermeture de fissure, réduisent ΔK_{eff} et ralentissent la propagation.

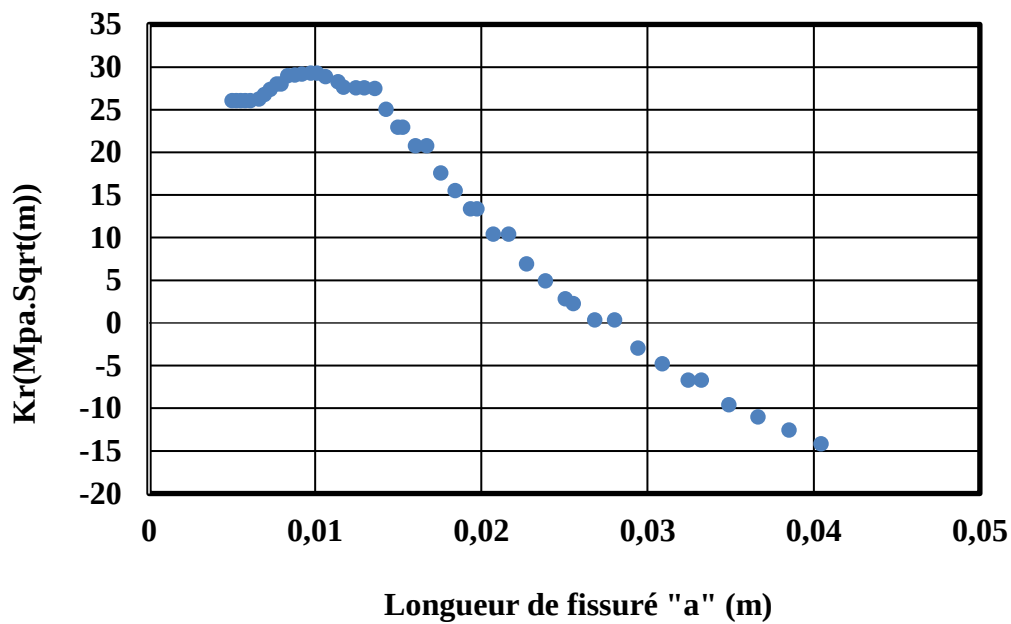


Figure4. 16 : Evolution du facteur Kr en fonction de la longueur "a"

4. Effet du bloc de chargement avec et sans contraintes résiduelles :

La figure 4.17 présentée Le spectre de chargement en trois blocs (5 000 – 10 000 – 5 000 cycles) permet d'analyser l'effet des variations d'amplitude sur la propagation des fissures

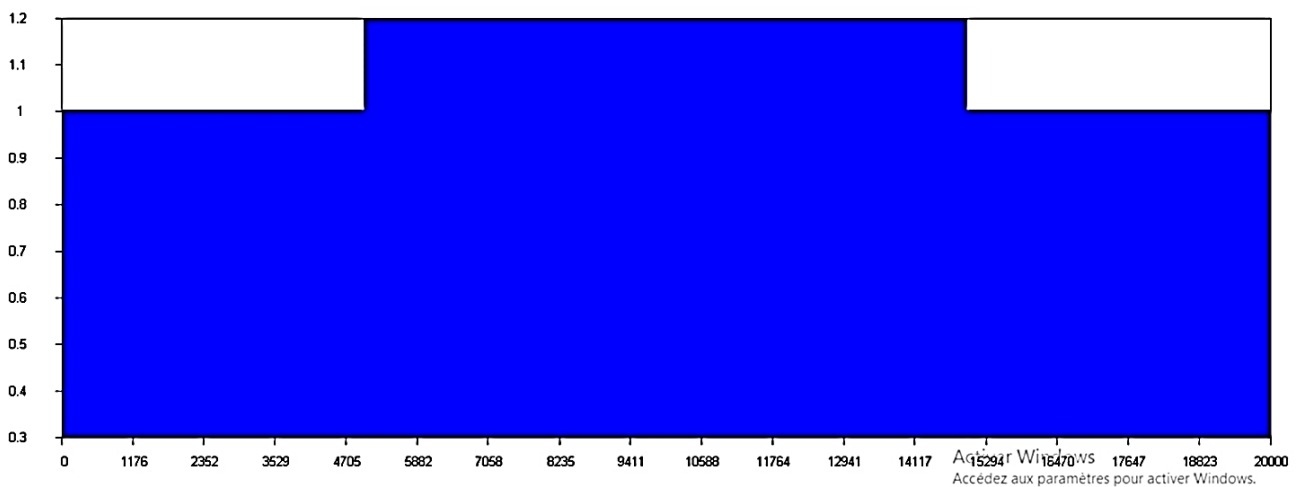


Figure 4.17 : Chargement variable pour R=0.3 et ($\sigma_1=172$ MPa $\sigma_2=206.4$ MPa $\sigma_1=172$ MPa)

La figure 4.18 présente l'évolution de la longueur de fissure "a" en fonction du nombre de cycles "N" pour les cas avec (CR) et sans contraintes résiduelles (SCR), mettant en évidence leur effet défavorable sur la tenue en fatigue. Pour atteindre une taille critique de 0.04 mm, l'échantillon SCR atteint environ 2.1×10^5 cycles, l'échantillon CR rompt plus tôt, vers 1.65×10^5 cycles ? soit une réduction d'environ 20 %.

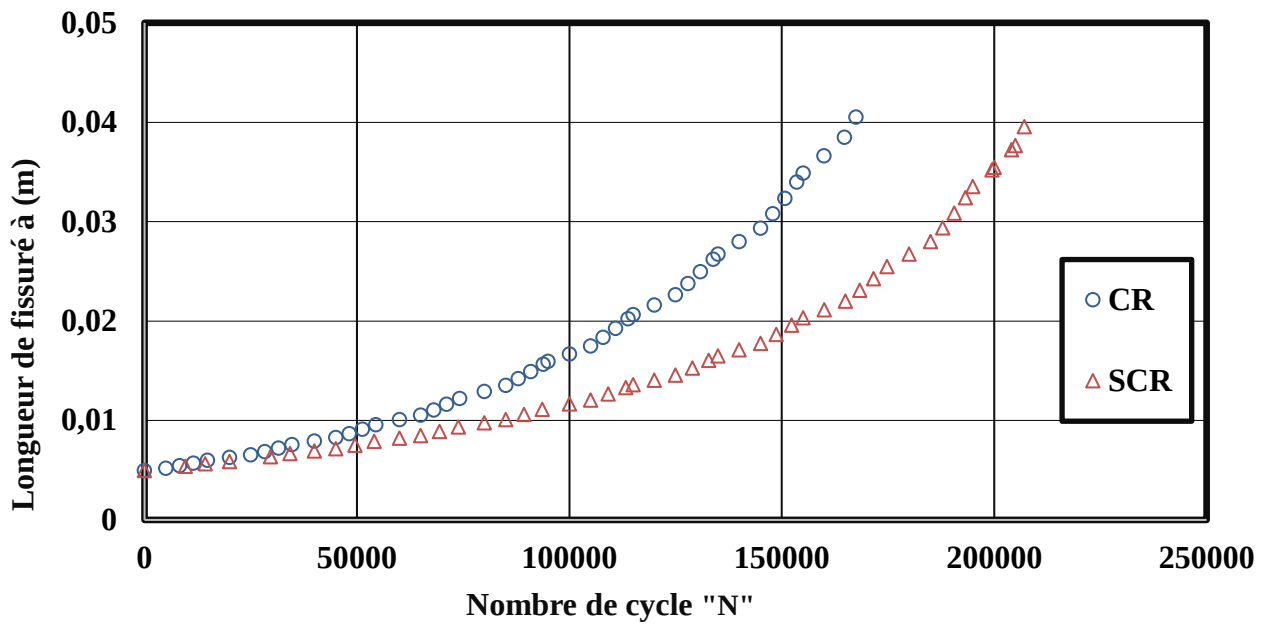


Figure 4.18 : Effets des contraintes résiduelles et chargements cycliques sur évolution de la longueur de la fissure

La figure 4.19 montre l'évolution de la vitesse de propagation da/dN en fonction de la longueur de fissure " a ", mettant en évidence la sensibilité du matériau aux sollicitations. La courbe avec contraintes résiduelles (CR) est systématiquement au-dessus de celle sans contraintes résiduelles (SCR), indiquant une accélération de la fissuration due aux contraintes de traction, qui augmentent R_{eff} et ΔK_{eff} .

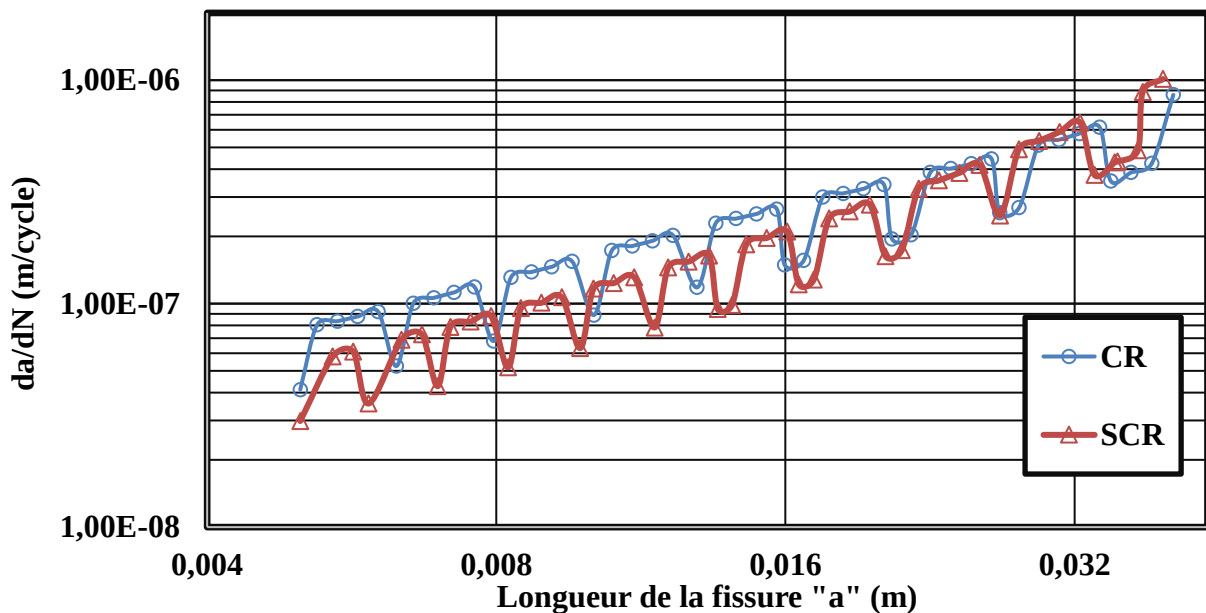


Figure 4.19 Effet des contraintes résiduelles et chargements cycliques sur la vitesse de fissuration

La figure 4.20 illustre la vitesse de propagation da/dN en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte ΔK , mettant en évidence la loi de Paris modifiée par les contraintes résiduelles. La courbe CR est systématiquement au-dessus de la courbe SCR, ce qui signifie qu'à ΔK identique, la fissuration est plus rapide en présence de contraintes résiduelles de traction. Cet effet provient de l'augmentation de K_m et de R_{eff} , entraînant une hausse de ΔK_{eff} et une ouverture plus précoce de la fissure.

L'influence est particulièrement marquée dans le domaine des faibles valeurs de ΔK , correspondant au régime initial de propagation, avec une réduction du seuil effectif de croissance. En revanche, lorsque ΔK augmente, les courbes CR et SCR tendent à converger, car l'effet du chargement externe devient dominant. La pente globale restant similaire dans les deux cas indique que le mécanisme fondamental de fissuration du matériau n'est pas modifié mais que seule la force motrice est amplifiée en CR.

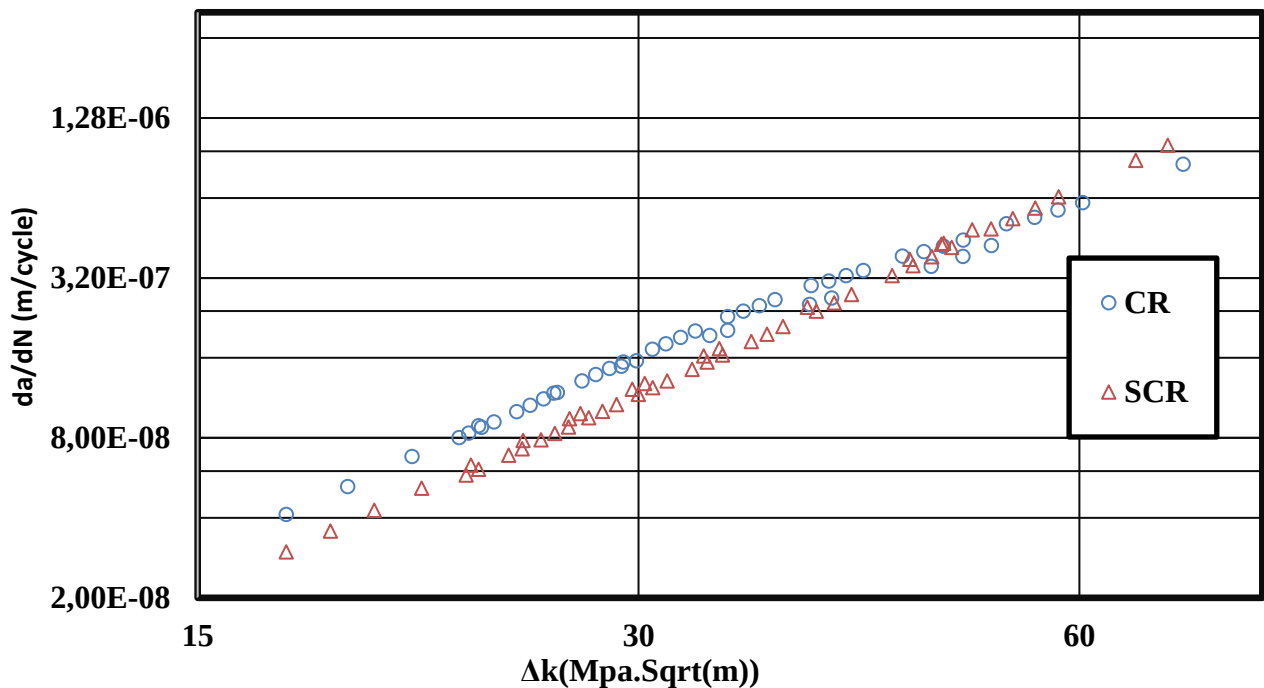


Figure 4.20 Effet des contraintes résiduelles et chargements cycliques sur da/dN

La figure 4.21 présente l'évolution du rapport de cycle effectif R_{eff} en fonction de la longueur de fissure a , établissant le lien entre contraintes résiduelles et propagation. Sans contraintes résiduelles (SCR), R_{eff} oscille entre 0.25 et 0.3, suivant le spectre de chargement. En présence de contraintes résiduelles (CR), il atteint initialement environ 0.65, traduisant la superposition de contraintes de traction et le décalage du cycle vers des niveaux plus élevés, ce qui réduit la fermeture de fissure et accélère la propagation.

Avec l'augmentation de "a", R_{eff} diminue progressivement en CR, en raison de la relaxation des contraintes résiduelles.

Pour $a > 0.03m$, il peut devenir inférieur au cas SCR, suggérant soit des contraintes résiduelles de compression, soit une dissipation de l'énergie élastique. Enfin, les fluctuations observées reflètent l'effet du chargement à amplitude variable, tout en confirmant que le comportement reste fortement influencé par le spectre appliqué.

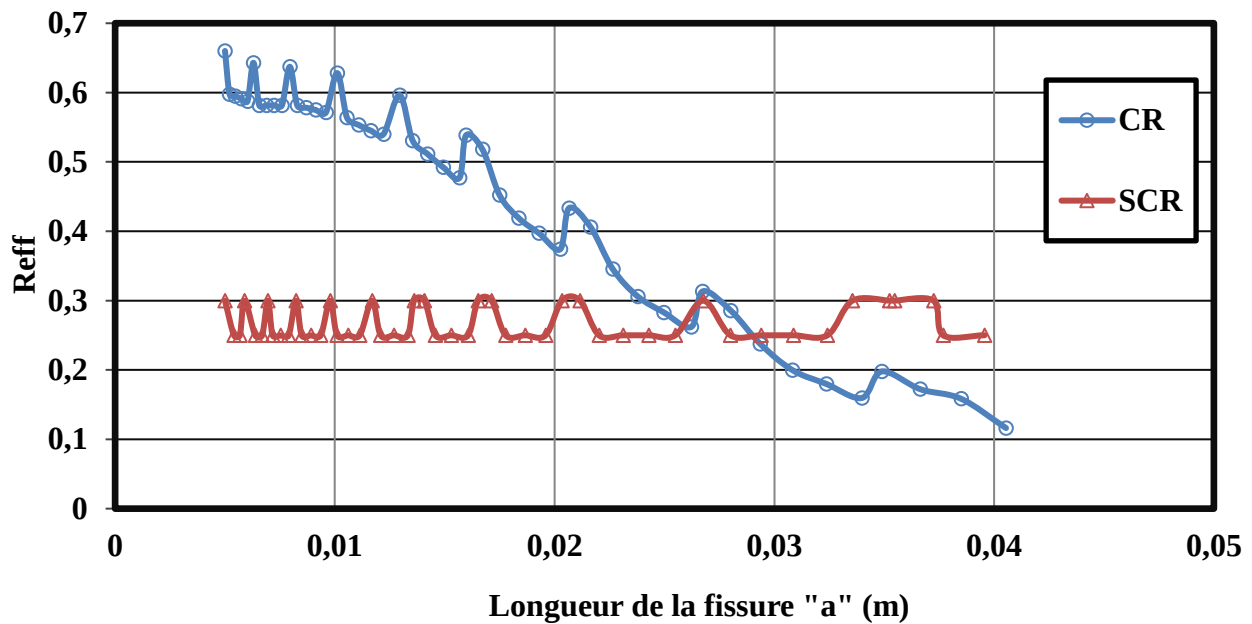


Figure 4.21 : Evolution du rapport " R_{eff} " en fonction de "a" et en présence des contraintes résiduelles

La figure 4.22 illustre un spectre de chargement (10 000 – 10 000 cycles) avec une augmentation brutale du niveau de contrainte au cycle 10 000. Cette transition entraîne une hausse immédiate de K_{max}

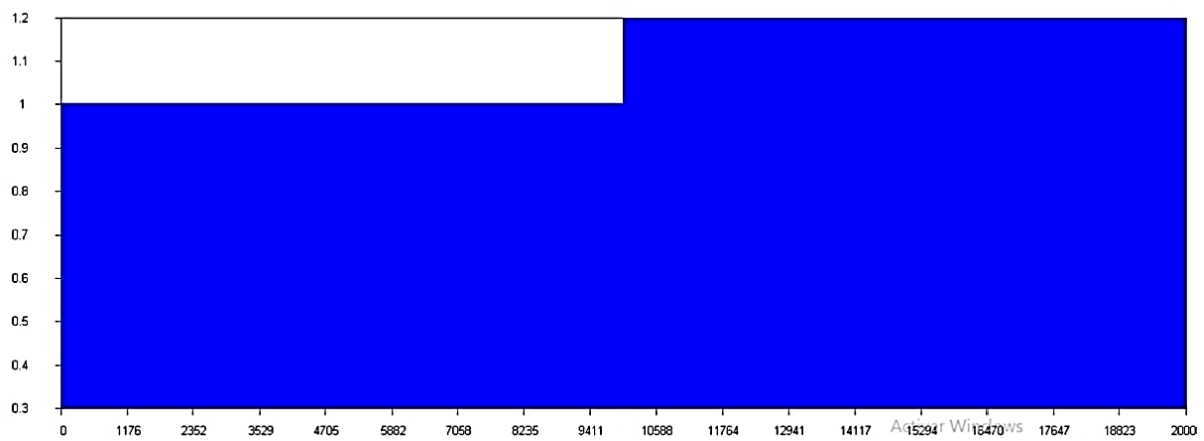


Figure 4.22 : Chargement variable pour $R=0.3$ et ($\sigma_1=172$ MPa $\sigma_2=206.4$ MPa)

La figure 4.23 montre l'évolution de la longueur de fissure a en fonction du nombre de cycles révélant une inversion de tendance : les contraintes résiduelles (CR) améliorent ici la durée de vie en fatigue. Pour atteindre 0.04 m, l'échantillon SCR atteint environ 1.7×10^5 cycles, l'échantillon CR atteint environ 2.1×10^5 cycles, soit un gain supérieur à 20 %.

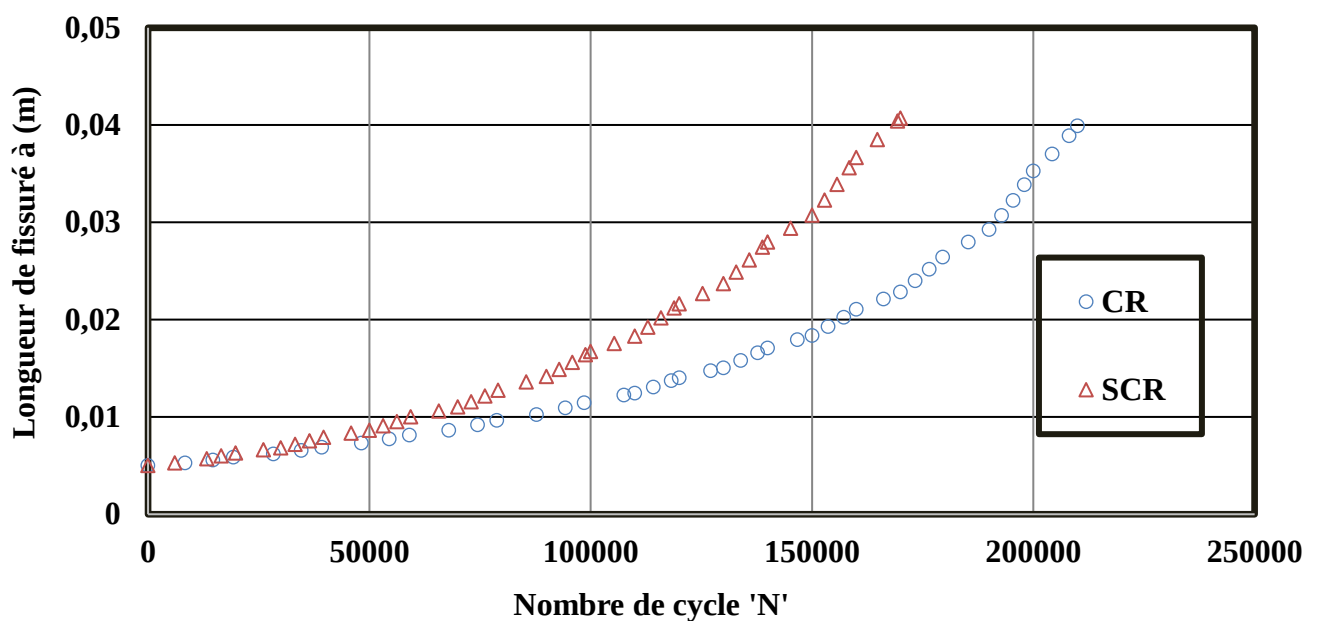


Figure 4.23 : Effets des contraintes résiduelles et chargements cycliques sur évolution de la longueur de la fissure

La figure 4.24 présente l'évolution de da/dN en fonction de la longueur de fissure a en échelle logarithmique, mettant en évidence l'influence locale des contraintes résiduelles. La courbe avec contraintes résiduelles (CR) se situe systématiquement en dessous de celle sans contraintes résiduelles (SCR), traduisant un ralentissement significatif de la propagation.

Les oscillations observées reflètent les variations du spectre de chargement, avec des fluctuations de da/dN liées aux transitions entre blocs. Malgré l'augmentation de la vitesse lors du passage au bloc de forte amplitude, notamment pour $0.015 \text{ m} \leq a \leq 0.02 \text{ m}$, l'écart entre CR et SCR reste marqué, la configuration CR conservant des vitesses plus faibles.

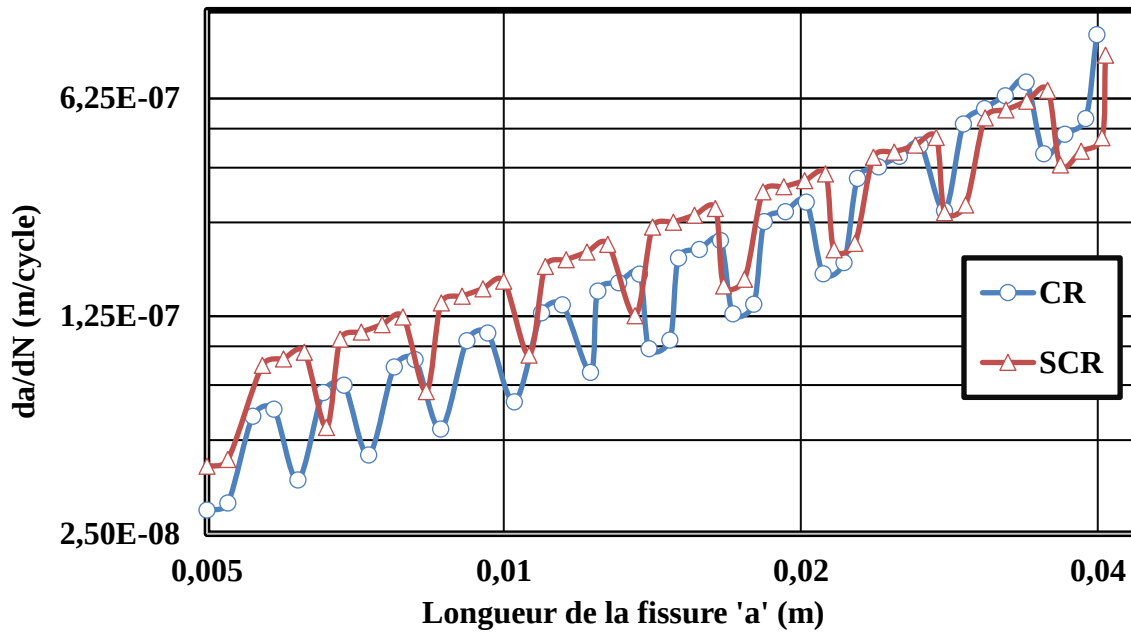


Figure 4.24 Effet des contraintes résiduelles et chargements cycliques sur la vitesse de fissuration

La figure 4.25 illustre l'évolution de da/dN en fonction de ΔK en échelle logarithmique, permettant de comparer les cas SCR et CR. La courbe CR se situe systématiquement en dessous de SCR, indiquant une diminution notable de la vitesse de propagation pour une même valeur de ΔK , et donc un effet bénéfique des contraintes résiduelles.

Sous chargement à amplitude variable, cet effet reste dominant, surtout pour les faibles et moyennes valeurs de ΔK . En revanche, pour des ΔK élevés, les courbes CR et SCR tendent à converger, le chargement externe devenant prépondérant lorsque la fissure grandit, ce qui réduit l'influence des contraintes résiduelles.

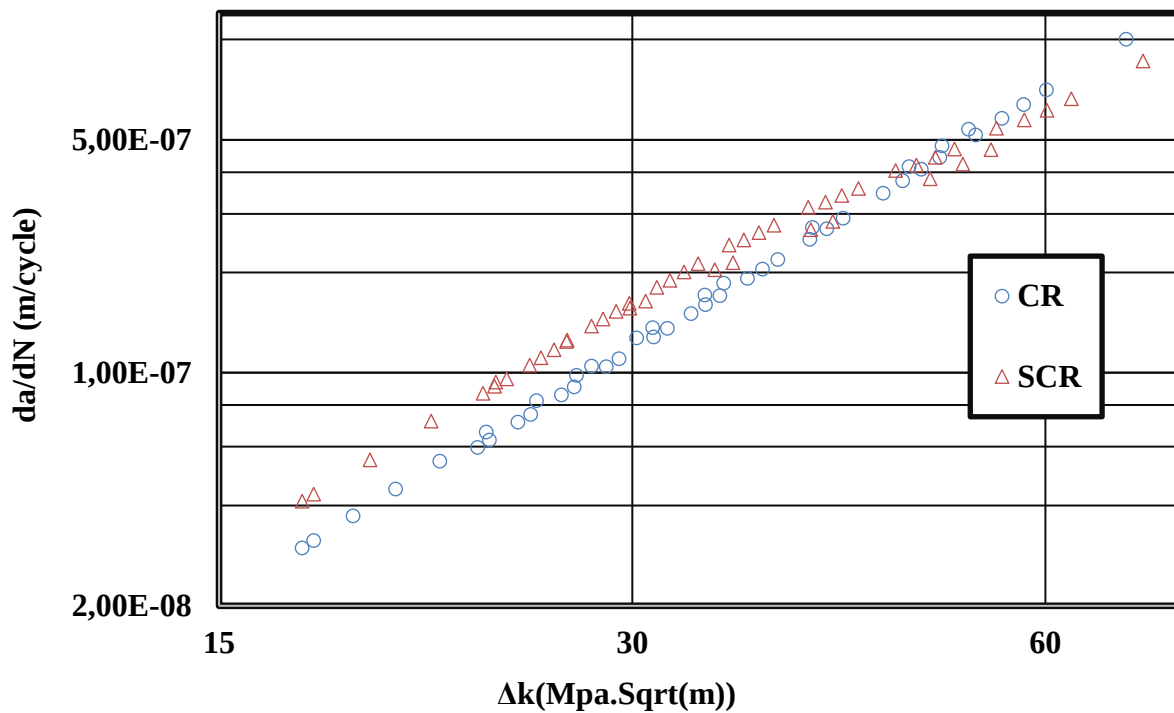


Figure 4.25 Effet des contraintes résiduelles et chargements cycliques sur da/dN

La figure 4.26 présente l'évolution du rapport de cycle effectif R_{eff} en fonction de la longueur de fissure a pour les cas SCR et CR. En SCR, R_{eff} débute à une valeur élevée proche de 0.65 pour les fissures courtes, puis diminue progressivement jusqu'à des valeurs inférieures à 0.2 en fin de propagation, avec des oscillations liées au spectre de chargement.

En présence de contraintes résiduelles (CR), R_{eff} est initialement plus faible, autour de 0.3, indiquant un effet compressif favorisant la fermeture de fissure et réduisant ΔK_{eff} . Un point de transition apparaît vers $a \approx 0.024m$, où $R_{eff\ CR}$ devient supérieur à $R_{eff\ SCR}$, traduisant une redistribution du champ résiduel.

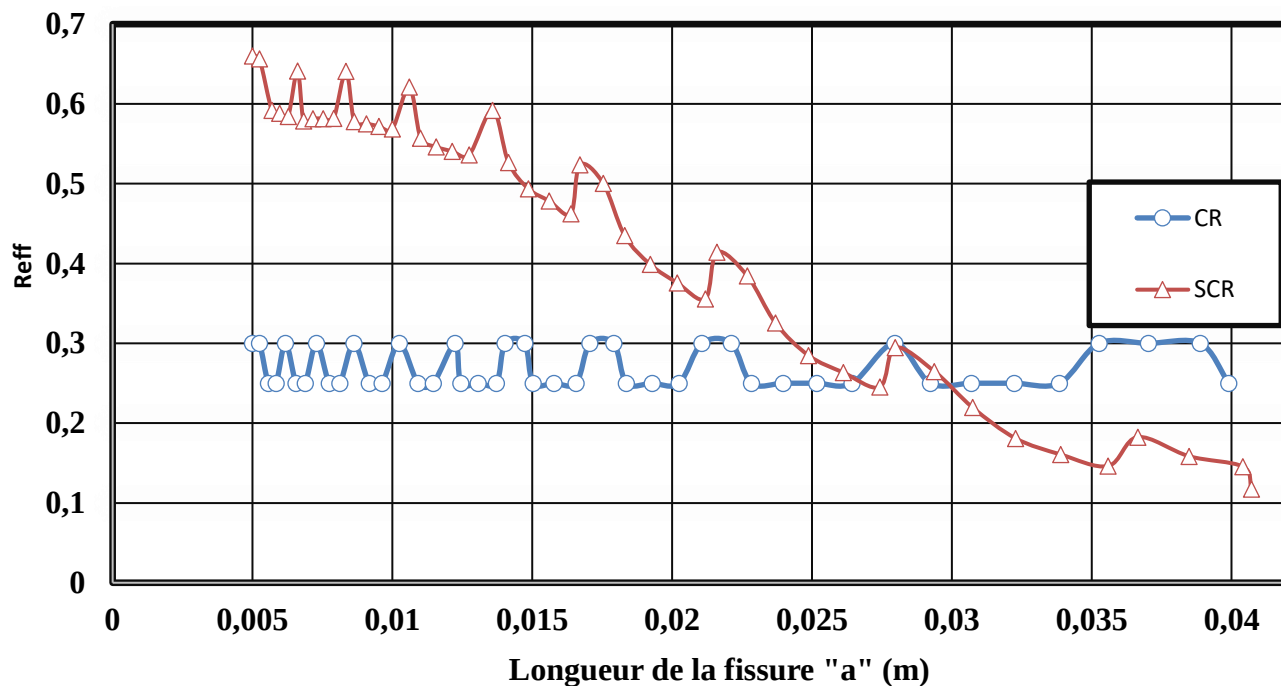


Figure 4.26 Evolution du rapport " R_{eff} " en fonction de " a " et en présence des contraintes résiduelles

La figure 4.27 présente un spectre (10 000 – 10 000 cycles) avec un premier bloc à forte amplitude (≈ 1.2) suivi d'un bloc à amplitude plus faible (≈ 1.0)

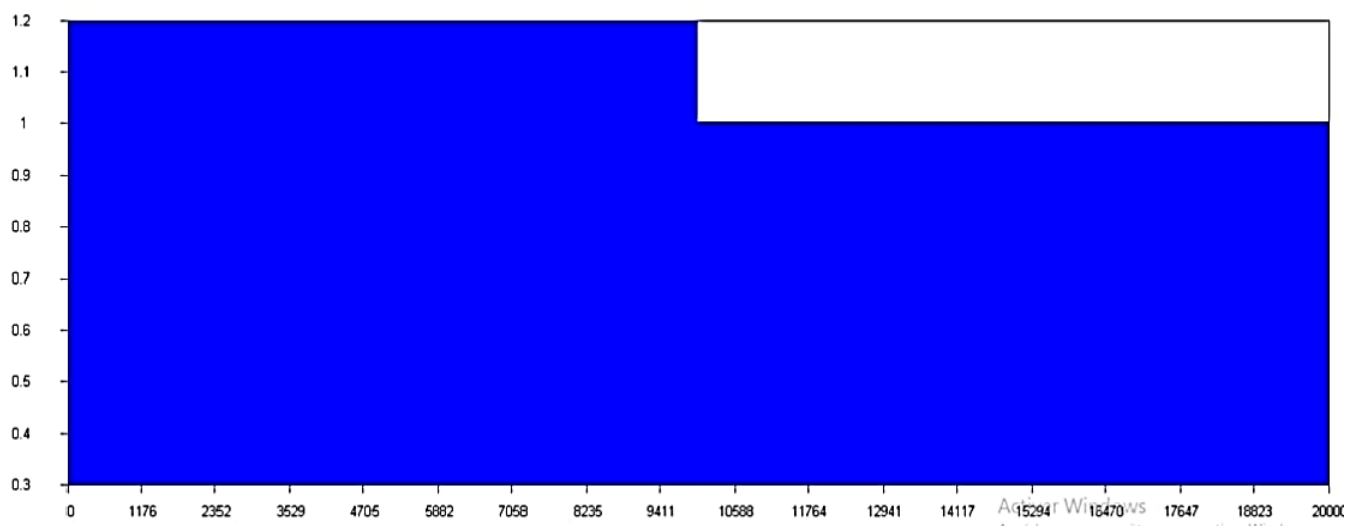


Figure 4.27: Chargement variable pour $R=0.3$ et ($\sigma_1=206.4$ MPa $\sigma_2=172$ MPa)

La figure 4.28 montre l'évolution de la longueur de fissure a en fonction du nombre de cycles " N " pour un spectre répétitif 10000–10000, en comparant les cas SCR et CR. Les résultats mettent en évidence une accélération nette de la propagation en présence de contraintes résiduelles, la courbe CR restant systématiquement au-dessus de SCR.

Pour atteindre une fissure critique de 0.04 mm, la durée de vie est d'environ 2.05×10^5 cycles pour SCR, contre environ 1.65×10^5 cycles pour CR, soit une réduction d'environ 20 %. Ce comportement s'explique par un champ de contraintes résiduelles principalement en traction, qui augmente K_m et R_{eff} , favorise l'ouverture de fissure, réduit la fermeture de fissure et accroît ΔK_{eff} , entraînant une propagation plus rapide selon la loi de Paris

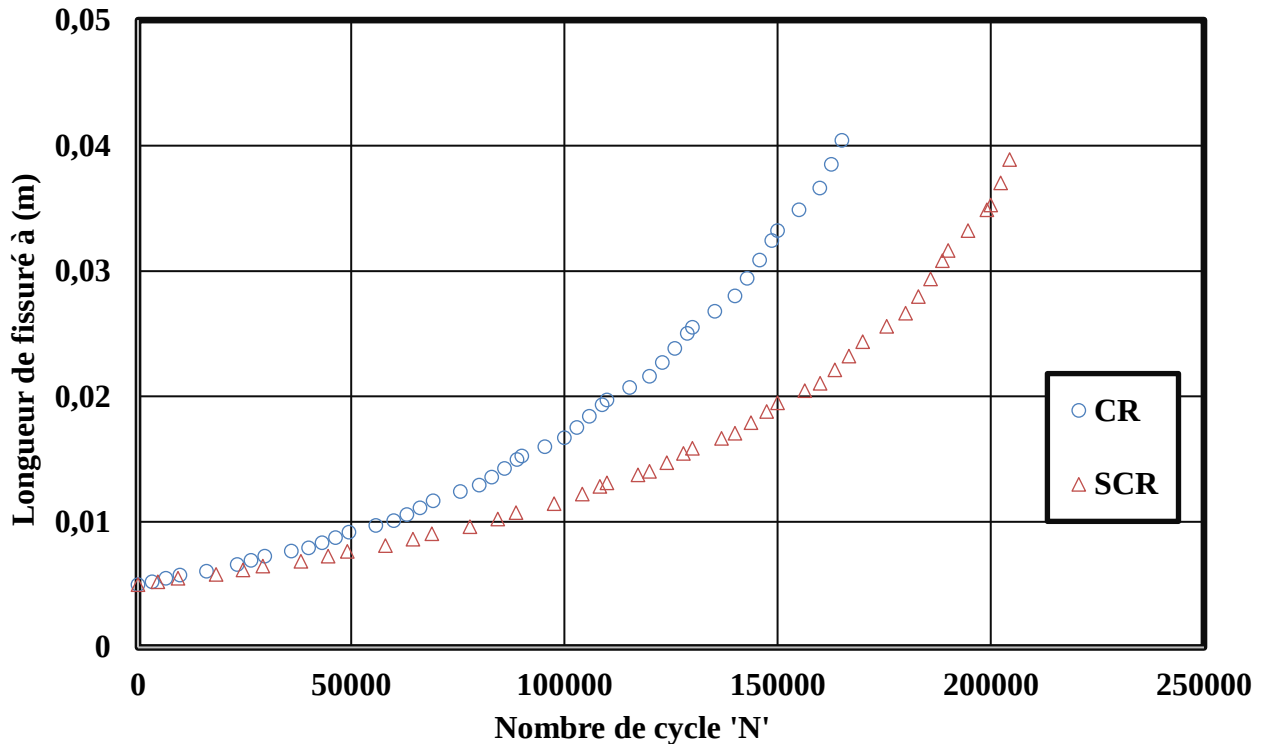


Figure 4.28 : Effets des contraintes résiduelles et chargements cycliques sur évolution de la longueur de la fissure

La figure 4.29 présente l'évolution de la vitesse de propagation da/dN échelle logarithmique en fonction de la longueur de fissure "a", pour les configurations CR et SCR sous chargement à amplitude variable. Les courbes montrent des oscillations marquées, liées aux variations du spectre de chargement.

Dès les premiers stades de propagation ($a < 0.020$ m), la vitesse est globalement plus élevée en CR qu'en SCR, traduisant l'effet défavorable de contraintes résiduelles de traction qui maintiennent la fissure ouverte, augmentent K_m et ΔK_{eff} , et accélèrent la propagation selon la loi de Paris.

Au-delà de $a \approx 0.020$ m. le comportement devient plus instable avec un rapprochement progressif des courbes et des inversions locales, notamment autour de $a \approx 0.024$ m et entre 0.033 m et 0.038 m. où CR devient temporairement inférieur à SCR. Ces fluctuations résultent de l'interaction entre la redistribution du champ de contraintes résiduelles et les effets de retard induits par les surcharges.

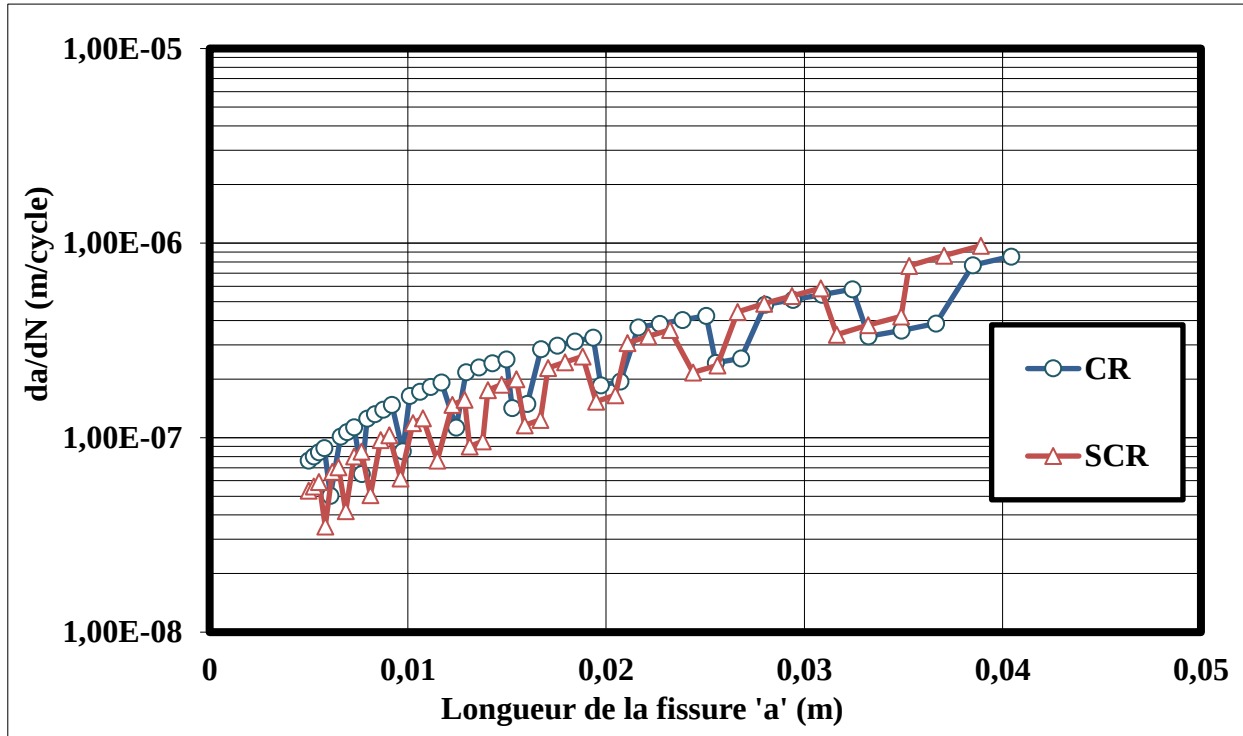


Figure 4.29 Effet des contraintes résiduelles et chargements cycliques sur da/dN

La figure 4.30 présente l'évolution de la vitesse de fissuration da/dN en fonction de ΔK . Bien que différente du diagramme classique de Paris, cette représentation permet de comparer clairement l'effet des contraintes résiduelles.

La courbe CR se situe systématiquement au-dessus de SCR indiquant qu'à ΔK identique, la vitesse de propagation est plus élevée en présence de contraintes résiduelles. Cela confirme l'effet délétère de contraintes de traction, qui augmentent R_{eff} , réduisent la fermeture de fissure et accroissent ΔK_{eff} , accélérant ainsi la propagation selon la loi de Paris

Pour des valeurs élevées de ΔK , une convergence des courbes est observée, traduisant la domination du chargement externe lorsque la fissure devient grande. ce qui réduit l'influence des contraintes résiduelles.

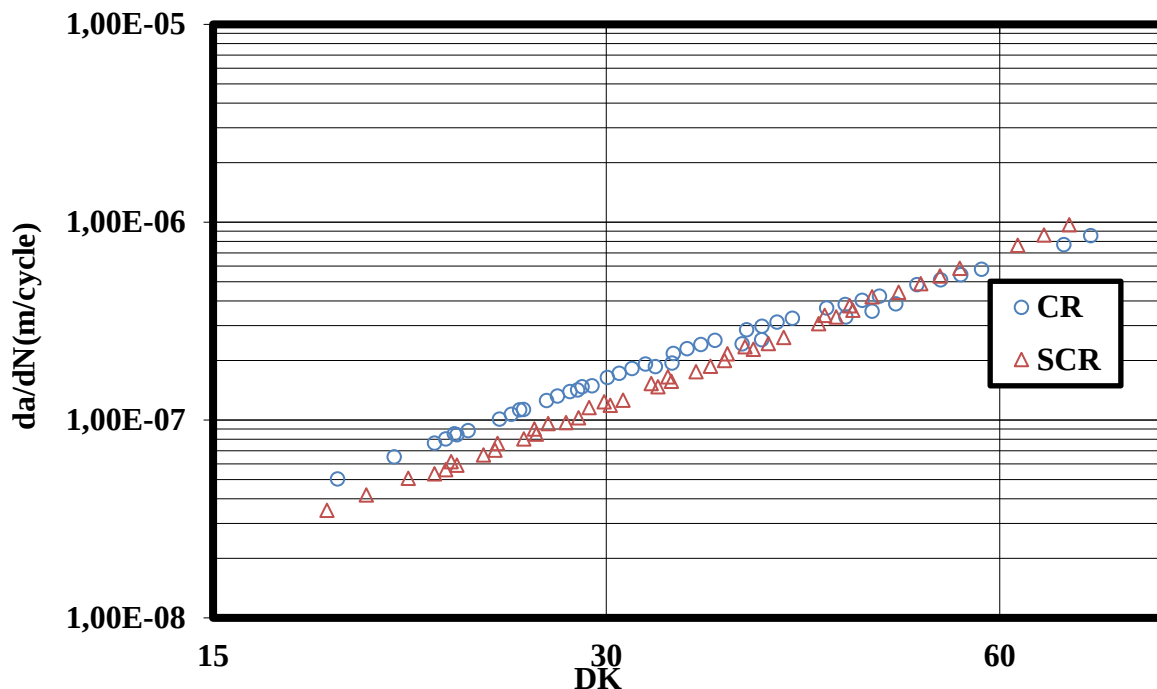


Figure 4.30 Effet des contraintes résiduelles et chargements cycliques sur la vitesse de fissuration

La figure 4.31 présente l'évolution du rapport de cycle effectif R_{eff} en fonction de la longueur de fissure "a"

Dans le cas SCR, R_{eff} varie de manière stable entre 0.25 et 0.3, en accord avec le rapport de charge appliqué. En revanche, en présence de contraintes résiduelles CR, R_{eff} est initialement très élevé, autour de 0.6 à 0.65 pour $a < 0.01m$, traduisant l'effet de contraintes de traction qui réduisent la fermeture de fissure et augmentent ΔK_{eff} ce qui accélère la propagation.

Avec l'augmentation de "a", R_{eff} diminue progressivement pour atteindre environ 0.4 vers $a \approx 0.02 m$, en raison de la relaxation des contraintes résiduelles. Un point critique apparaît vers $a \approx 0.027 m$, où $R_{eff CR}$ devient inférieur à $R_{eff SCR}$, indiquant le passage à une zone dominée par des contraintes résiduelles de compression ou par des effets de fermeture accrus.

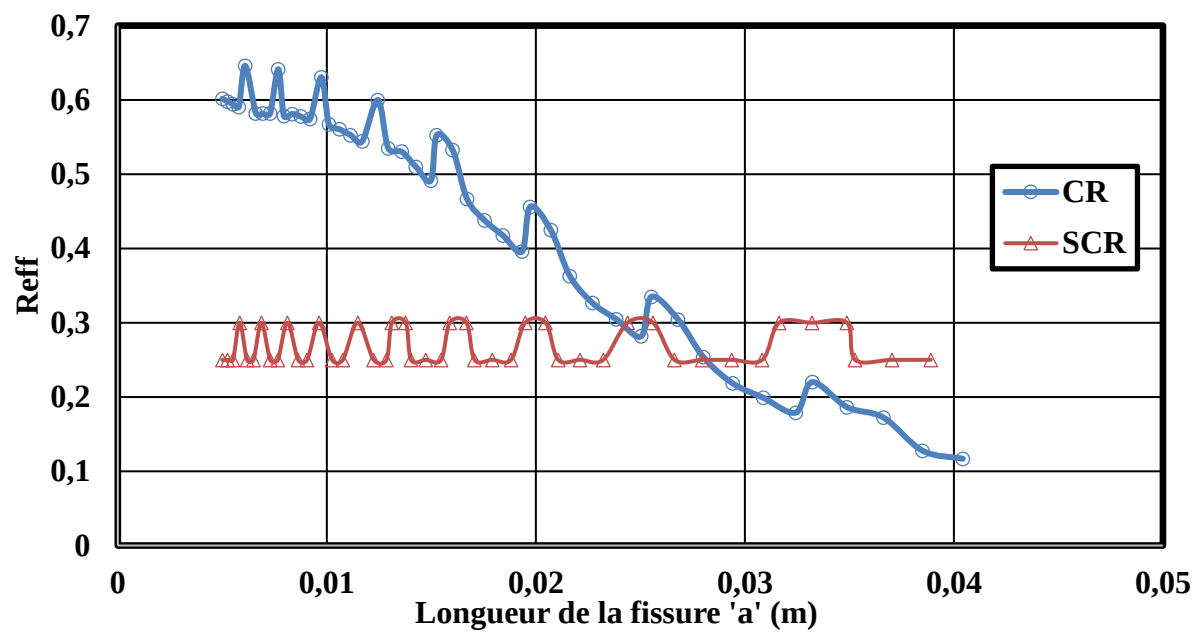


Figure4.31 : Evolution du rapport " R_{eff} " en fonction de " a " et en présence des contraintes résiduelles

Conclusion :

Ce chapitre porte sur l'étude de l'influence des contraintes résiduelles de soudage sur la propagation des fissures de fatigue dans un assemblage soudé soumis à un chargement à amplitude variable. Les simulations numériques ont été réalisées à l'aide du logiciel AFGROW, en intégrant différents spectres de chargement de et blocs répétitifs, afin d'analyser l'interaction entre plasticité cyclique et champ de contraintes résiduelles.

Les résultats mettent en évidence une dualité d'effet des contraintes résiduelles. Les contraintes de traction accélèrent la propagation des fissures en augmentant le rapport de cycle effectif R_{eff} et la force motrice effective ΔK_{eff} , réduisant ainsi significativement la durée de vie en fatigue, avec des pertes pouvant atteindre environ 20 %. À l'inverse, les contraintes résiduelles de compression favorisent la fermeture de fissure et induisent un ralentissement de la cinétique de fissuration, conduisant à une amélioration notable de la durée de vie.

L'étude montre également que l'influence des contraintes résiduelles est fortement dépendante du spectre de chargement appliqué. Les séquences de amplifient les effets de retard liés à la plasticité, tandis que les spectres tendent à favoriser une propagation continue et accélérée. Par ailleurs, la redistribution du champ de contraintes résiduelles au cours de la propagation, caractérisée par un passage de zones de traction à des zones de compression, confère au phénomène un comportement non linéaire et évolutif.

Ces travaux soulignent l'importance de considérer simultanément le champ de contraintes résiduelles et le spectre de chargement réel pour une prédiction fiable de la durée de vie des structures soudées. Cette approche permet une meilleure compréhension des mécanismes de fissuration et constitue un outil essentiel pour l'évaluation de l'intégrité structurale

Conclusion générale

Ce mémoire s'est consacré à l'étude de l'influence combinée des contraintes résiduelles induites par le soudage et le chargement cyclique sur le comportement en fatigue des matériaux métalliques. L'objectif principal était de quantifier l'effet de ces contraintes internes sur la propagation des fissures et sur la durée de vie en fatigue, en tenant compte du type de chargement appliqué ainsi que de la longueur de la fissure.

Les résultats obtenus montrent que l'augmentation du rapport de charge R influence la propagation des fissures en modifiant à la fois la vitesse de fissuration da/dN et la durée de vie en fatigue, avec un effet plus marqué en dehors de la zone de propagation stable. En présence de contraintes résiduelles, cette tendance reste globalement la même, mais l'effet observé peut être interprété à travers la variation du rapport de charge effectif R_{eff} . En définitive, ce travail confirme qu'une prise en compte rigoureuse des contraintes résiduelles est indispensable pour réaliser des analyses de fatigue fiables et pour évaluer avec précision la durabilité des structures soudées. Il met également en évidence des perspectives intéressantes pour l'optimisation des procédés de soudage, des traitements de relaxation des contraintes et des méthodes de contrôle, afin de limiter les effets défavorables des contraintes résiduelles et d'améliorer la performance des structures en service.

Références bibliographiques

- [1] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fatigue_\(mat%C3%A9riau\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fatigue_(mat%C3%A9riau))
- [2] STEPHENS R.I., A. Fatmi, R.R. Stephenson H.O. Fuchs, Metal fatigue in engineering, 2nd edition, John Wiley and sons, New-York, 2001, ISBN0-471-51059-9, p.472
- [3] Guèye Diagne (2018). Influence des paramètres d'usinage et de chargement sur le comportement en fatigue des attaches à doigts d'ailettes de turbine à vapeur. UnivLorraine, France.
- [4] R.O. Ritchie (1977). Influence of microstructure on near-threshold fatigue-crack propagation in ultra-high strength steel. Metal Science, 11(8-9), pp 8-9.
- [5] P. Hariprasath, P. Sivaraj, V. Balasubramanian, Srinivas Pilli, K. Sridhar (2023). Influence of stress ratio on fatigue behaviour of gas metal arc welded naval grade HSLA steel joints: Assessment of safe and unsafe region for ship hull fabrication. Engineering Failure Analysis. Volume 148, 107216.
- [6] Martin Leitner (2017). Influence of effective stress ratio on the fatigue strength of welded and Hfmi-treated high-strength steel joints. International Journal of Fatigue, Volume 102, pp. 158-170.
- [7] Walker, E.K. (1970). The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7076-T6 aluminum. In: Effect of environment and complex load history on fatigue life", ASTM STP 462, pp.1–14.
- [8] Forman, R.G., (1972). Study of fatigue crack initiation from flaws using fracture mechanics theory. Engineering Fracture Mechanics. Vol. 4(2), pp. 333–345.
- [9] R.O. Ritchie (1977). Influence of microstructure on near-threshold fatigue-crack propagation in ultra-high strength steel. Metal Science, 11(8-9), pp 8-9.
- [10] BOIVIN Y., Approche moderne de conception et d'analyse de durabilité d'un châssis de motoneige, Mémoire de maîtrise, Faculté des sciences appliquées, Département de génie mécanique, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 1999, p.105
- [11] SHARP M.L., G.E. NORDMARK et C.C. MENZEMER, Fatigue design of aluminum components and structures, McGraw-Hill, New-York, 1996, ISBN 0-07-056970-3, p.353
- [12] Design of Aluminium Structures, Eurocode 9, part 2, Draft for development DD ENV 1999-2:2000, British Standards Institution, London, 2000, ISBN 0-580-36783-5, p.91
- [13] Aluminum Design Manual - Specifications & Guidelines for Aluminum Structures, The Aluminum Association, Washington, 1994 59
- [14] Fermér M. et H. Svensson, Industrial experiences of FE-based fatigue life predictions of welded automotive structures, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 24, pp. 489-500, 2001
- [15] Niemi E., W. Fricke et S.J. Maddox, Fatigue analysis of welded components: Designer's guide to the structural hot-spot stress approach, International Institute of Welding, Woodhead Publishing, Cambridge, 2006, IIW-1430-00, ISBN 1-84569-1245, p.50
- [16] Yousefi F., M. Wittet H. Zenner, Fatigue strength of welded joints under multiaxial loading: experiments and calculations, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 24, pp. 339-355, 200
- [17] Lieurade H.P., La fatigue des métaux, Institut Supérieur des Matériaux et de la Construction Mécanique, Saint Ouen, 1999
- [18] Bazergui A. et al., Résistance des matériaux, 2^e édition, Éditions de l'école Polytechnique de Montréal, Montréal, 1993, p. 593
- [19] Shigley, J.E., Mischke, C.R. Mechanical Engineering Design, 7^e édition, McGraw-Hill, 2004
- [20] MESSABIH, F.Z. (2018). Contribution à l'optimisation des paramètres de soudage des différentes zones soumises à des sollicitations cycliques de fatigue (These de doctorat). Université djillali liabés, Sidi bel Abbes, Algérie.

[21] G. Pluvinage. « L'effet d'entaille en fatigue et en rupture ». Laboratoire de Fiabilité Mécanique (LFM). Metz, France. 2003.

[22] H. Zedira, A. B. Cracking of welded monoblock of the mechanical shovels 9210. Third Mechanical and Industrial Engineering. Amman, Jordan: [s.n.]. 1999. p. 851-869.

[23] Maddox, Stephen (2000). "Conception de fatigue et régies pour les structures soudées".

Progrès en ingénierie structurelle et matériaux.

[24] Weld detail fatigue life improvement techniques, SSC-400, August 26, 1997

[25] L.L. MET-X, (1992). Détermination des contraintes résiduelles par diffraction des rayons X". ENSAM Paris, Paris, Document de formation générale.

[26] H. Krause, H.-H. Jühe, (1977). Internal stresses during rolling friction and their evaluation. Wear, Volume 41, Issue 1, pp.15-23.

[27] M. Clavel, A. Pineau. "Fatigue behaviour of two nickel-base alloys II: Physical modelling of the fatigue crack propagation process", Mat. Sci. And Engn., Vol 55: p 173-180, 1982.

60

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

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

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

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

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

[33] Akihiko Ohta, Naoyuki Suzuki, Yoshio Maeda, (1997). Unique fatigue threshold and growth properties of welded joints in a tensile residual stress field, International Journal of Fatigue, Vol. 19(93), pp 303-310.s

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

[35] Zhang, X., Wang, J., Ma, Y., Liu, D., Gao, R., Xu, R., Zhao, Z., Chen, S., Wang, Z. (2024). Residual stress effects on short crack propagation behavior in friction stir welded 7075-T6 aluminum alloy panel Under biaxial loading : An experimental and numerical study, Engineering Fracture Mechanics (2024),

[36] Braun R, Biallas G, Dalle Donne C, Staniek G. (2000). Characterisation of mechanical properties and corrosion performance of friction stir welded 6013 aluminium alloy sheet. In : Winkler PJ, editors. Proc EUROMAT99 – materials for transportation technology, vol.1. Weinheim : Wiley-VCH ; 2000. p. 150–5.

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

[38] Hensel, J., Nitschke-Pagel, T. & Dilger, K. (2017). Engineering model for the quantitative consideration of residual stresses in fatigue design of welded components. Weld World 61, 997–1002 (2017).61

[39] Le Wang, Xudong Qian (2022). Welding residual stresses and their relaxation under cyclic loading in welded S550 steel plates. International Journal of Fatigue 162, 106992

[40] Jean-Loup CURTAT « mémoire étude de l'effet du martelage sur la vie en fatigue de l'acier E309L utilisé pour la réparation de turbines en acier 13Cr-4Ni » le 26 Mai 2016

[41] J. Aharter, (2006). "AFGROW users guide and technical manual: AFGROW for Windows

- 2K/XP". Version 4.0011.14, Air Force Research Laboratory
- [42] SERIARI, F. Z. (2023). Étude du comportement en rupture par fatigue des structures réparées par patch sous chargement variable (Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen). pp. 17–23.
- [43] Willenborg, J., Engle retardation model using an effective stress concept (Reort No. AFFDL-TR-71-1). Air Force Flight Dynamics laboratory, Wright-patterdon Air Force Base, Ohio.
- [44] P.K. Gallagher and D. A. hughes, the effect of residual stresses on fatigue crack propagation welded structures. Journal of pressure vessel technology, vol.96,no.3, pp.214-220,1974
- [45] BENGUEDIAB D., Etude de la propagation des fissures de fatigue sous spectres d echargement réduits. These de Doctorat, Université de Poitiers, France,1989.
- [46] J.A Harter, (2006). "AFGREW" users guide and technical manual: AFGREW for Windows 2K XP" . Vaersion 4.0011.14, Air Force Research Laboratry
- [47] Gliinka , " Effect of Residual Stres on fatigue crack Growth in steel weldments under Constant and Vaeiable Amplitude Loads," Fecture Mzchanics, ASTM STP 677,C,Smith,ed?American Society for Testing and materials ; 1979,pp,198