

Université des Sciences et Technologies de Lille

THESE DE DOCTORAT

Présentée par

Ruichun DUAN

Pour l'obtention du titre de

DOCTEUR en Mécanique

ETUDE DE L'ENDOMMAGEMENT EN FRETTEMENT – FATIGUE : APPLICATION AUX STRUCTURES BOULONNEES

Soutenue le 29 Novembre 2006 devant le jury composé de :

M. AZARI Zitouni , Professeur, Université de Picardie	Rapporteur
M. SHI Huiji , Professeur, Tsinghua Université, Pékin, Chine	Rapporteur
Mme. ROBIN Claude , Professeur, Ecole des Mines, Douai	Examineur
M. NAIT-ABDELAZIZ Moussa , Professeur, Polytech-Lille. USTL	Examineur
M. MESMACQUE Gérard , Professeur, USTL	Examineur
M. AMROUCHE Abdelwaheb , Maître de conférences, IUFM, V.d'Ascq	Examineur
M. GHYS Pascal , ALSTOM Transport, Valenciennes	Examineur

REMERCIEMENTS

Cette thèse a été réalisée au sein de l'équipe mécanique et matériaux IUT « A » du Laboratoire de Mécanique de Lille.

J'adresse mes remerciements à Monsieur le Professeur Gérard MESMACQUE pour m'avoir accueilli au Laboratoire de Mécanique de Lille et avoir encadré mon travail, pour les idées valeureuses, pour son soutien constant et son aide tout au long de cette thèse.

Je remercie vivement Monsieur Abdelwaheb AMROUCHE, Maître de conférence à l'IUFM de V. d'Ascq, qui a participé très activement à mon encadrement, pour son aide et ses conseils, son soutien constant au long de cette thèse, notamment lors de la rédaction de ce mémoire.

Je remercie chaleureusement Monsieur Huiji SHI, Professeur à l'Université de Tshinghua, Pékin, et Monsieur AZARI Zitouni, Professeur à l'Université de Picardie, pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse et de faire partie du jury.

Je suis reconnaissant à Madame le Professeur Claude Robin et Monsieur le Professeur Moussa NAIT-ABDELAZIZ, et Monsieur GHYS Pascal, ALSTOM Transport, Valenciennes, pour avoir accepté de faire partie du jury.

J'exprime ma gratitude à l'ambassade de France à Beijing pour m'avoir donné une bourse d'étude et au Service International du CROUS de Lille pour avoir facilité ma vie en France. Surtout un grand merci à Madame Daniel FABIS, Service International du CROUS Lille, pour ses aides pendant mes séjours en France..

Je remercie également tous mes collègues de l'équipe du Génie Mécanique à l'IUT « A », pour la contribution que chacun d'eux a pu m'apporter.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	3
SOMMAIRE.....	4
INTRODUCTION GENERALE	8
I. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	10
1.1 Introduction.....	10
1.2 Fretting usure	11
1.2.1 Description des essais	11
1.2.2 Carte de sollicitation et l’amorçage de fissures sous sollicitation de fretting	13
1.2.3 Propagation des fissures de fretting	18
1.2.4 Mécanisme de fretting et approche troisième corps.....	19
1.2.5 Facteurs influençant le fretting usure	22
1.2.6 Méthode corrective pour le fretting usure	26
1.3 Étude de fretting usure sous contrainte.....	27
1.3.1 Fretting - usure sous contrainte (ou fretting - fatigue statique).....	27
1.3.2 Influence de la contrainte statique sur le fretting -usure	27
1.4 Fatigue pure	28
1.4.1 L’essai de fatigue	28
1.4.2 Amorçage des microfissure de fatigue.....	31
1.4.3 Propagation des fissures longues (ou le stade II de la propagation)	34
1.4.4 Amélioration de la durée de vie de fatigue : Perçage et Expansion.....	35
1.5 Étude du fretting - fatigue	37
1.5.1 Description des essais de fretting fatigue.....	37
1.5.2 Amorçage de fissure en fretting fatigue	39
1.5.3 Propagation de fissures sous fretting fatigue	42
1.5.4 Influence et interaction de paramètres de la sollicitation.....	45
1.6 Étude du fretting fatigue pour les assemblages par rivetage ou boulonnage	48
1.7 Conclusion, description de la problématique.....	49
II: ÉTUDE EXPÉRIMENTALE.....	52
2.1 Introduction.....	52
2.2 Matériaux étudiés.....	52

2.2.1	Composition chimique	52
2.2.2	Essai de traction	53
2.3	Essai de fatigue avec les éprouvettes avec un trou central.	54
2.3.1	Éprouvettes utilisées	54
2.3.2	Conditions expérimentales de chargement.....	56
2.3.3	Les méthodes de suivie de la fissure.....	56
2.4	Essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux sur des éprouvettes avec un trou central.	56
2.4.1	Conditions expérimentales de chargement.....	57
2.4.2	Prise en compte du contact.....	57
2.4.3	Dispositif et équipement électronique.....	59
2.4.3.1	Principe de mesure	60
2.4.3.2	Etalonnage de la pièce.....	61
2.4.4	Le dispositif d'essai.....	62
2.5	Essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux sur des éprouvettes avec un trou central suivi d'une expansion à 4.5%.	63
2.5.1	Éprouvettes utilisées	63
2.5.2	Conditions expérimentales.....	65
2.6	Essais de fretting fatigue pour différents coefficients de frottement avec un trou central.....	66
2.6.1	Éprouvettes utilisées	66
2.6.2	Conditions expérimentales.....	66
2.7	Essais de fretting fatigue sur des assemblages boulonnés (Alu-Acier) avec un trou expansé et sans expansion.....	67
2.7.1	Éprouvettes et dispositif utilisés	67
2.7.2	Conditions expérimentales de chargement.....	68
III:	RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX.....	69
3.1	Résultats des essais	69
3.1.1	Résultats des essais de fatigue pour éprouvettes avec un trou central	69
3.1.2	Résultats des essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux sur des éprouvettes avec un trou central.	74
3.1.2.1	Durée de vie de fretting fatigue.....	74
3.1.2.2	Suivi de processus d'essai.....	77
3.1.3	Essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux sur des éprouvettes avec un trou central suivi d'une expansion à 4.5%.....	86

3.1.3.1	La durée de vie en fretting fatigue	86
3.1.3.2	Le suivi de processus d'essai	87
3.1.4	Comparaison entre les essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux sur des éprouvettes avec un trou central suivi d'une expansion à 4.5% et sans expansion.....	92
3.1.4.1	Durée de vie en fretting fatigue.....	92
3.1.4.2	Suivi de processus d'essai	93
3.1.5	Essais de fretting fatigue pour différents coefficients de frottement avec un trou central	98
3.1.5.1	Durée de vie en fretting fatigue.....	98
3.1.5.2	Suivi d'essai de fretting fatigue.....	99
3.1.6	Essais de fretting fatigue sur des assemblages boulonnés (Alu-Acier) avec un trou expansé et sans expansion	101
3.2	Analyses micrographiques.....	103
3.2.1	Analyse micrographique sur les éprouvettes avec un trou central pour les essais de fatigue	103
3.2.2	Analyse micrographique sur des éprouvettes avec un trou central pour les essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux.	108
3.2.2.1	Endommagement sur la surface du contact par fretting fatigue..	108
3.2.2.2	Aspect des fissures	113
3.2.3	Analyse micrographique sur les éprouvettes avec un trou central suivi d'une expansion à 4.5% et des essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux	122
3.2.3.1	Endommagement sur la surface du contact par fretting fatigue..	122
3.2.3.2	Aspect de la fissure pour l'essai de fretting fatigue sur une éprouvette avec expansion	126
3.2.4	Analyse micrographique avec différents coefficients de frottement.....	129
3.2.5	Analyse micrographique sur des assemblages boulonnés (Alu-Acier) avec un trou expansé et sans expansion après essais de fretting fatigue	131
IV	RÉSULTATS DE CALCUL NUMÉRIQUE	134
V	ANALYSE	147
5.1	Site de l'amorçage (Carte du Réponse du Matériau).....	147
5.2	Durée de vie	152
5.2.1	Durée de vie en fatigue avec un trou central.....	152
5.2.2	Durée de vie en fretting fatigue.....	153

VI. CONCLUSION GENERALE.....	156
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	158

INTRODUCTION GENERALE

Les assemblages par rivetage ou boulonnage représentent une part importante des liaisons et des points faibles (amorçage d'une fissure) des structures en alliage d'aluminium. Dans les assemblages, le champ de vibrations et les chargements en service occasionnent un endommagement de fretting fatigue sur les surfaces en contact. La dégradation de l'état de surface par endommagement de fretting joue un rôle important dans la diminution de la résistance à la fatigue de l'assemblage. L'action conjuguée du fretting et de la fatigue peut provoquer une réduction de la résistance à la fatigue. Ce phénomène s'appelle « fretting - fatigue ». Celui-ci est un des modes essentiels de l'endommagement des matériaux dans les assemblages par rivetage ou boulonnage.

Ce travail est consacré à étudier l'impact du fretting fatigue sur la durée de vie fonctionnelle d'un alliage d'aluminium 5086H24 dans l'assemblage aluminium - acier. Dans une première phase on réalise des essais de fatigue avec des éprouvettes comportant un trou central afin d'étudier l'effet d'entaille (trou central) sur le comportement à la fatigue. Ensuite, Dans une deuxième phase on réalise des essais de fretting-fatigue pour différents efforts normaux et pour différents coefficients de frottement afin d'étudier l'effet de ces paramètres sur la durée de vie en fretting fatigue. L'effet de l'expansion du trou est aussi étudié pour les différents efforts normaux. Dans les deux premières phases les essais sont réalisés sur une seule plaque, sans assemblage.

Dans une troisième phase, on réalise des essais de fretting-fatigue sur des assemblages boulonnés (Aluminium-Acier) (avec charge cyclique appliquée sur les plaques d'assemblage). Pour tous les essais on a suivi en continu les différents paramètres (contact, charge, déplacement,...). L'analyse micrographique permet d'identifier les caractéristiques de l'endommagement sur les surfaces en contact, les mécanismes d'amorçage et de propagation de (des) fissure (s). Un modèle numérique, prenant en compte le contact, a été développé et les calculs réalisés pour différents efforts normaux et différents coefficients de frottement. Les résultats numériques sont comparés aux résultats expérimentaux.

Le premier chapitre est consacré à la bibliographie sur le fretting fatigue. De nombreuses études sur le fretting-usure, la fatigue, le fretting et le fretting fatigue sont

présentées. En particulier, nous précisons et analysons les méthodes et résultats d'essais.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude expérimentale. Nous présentons les caractéristiques de matériau utilisé et les essais réalisés. Pour chaque type d'essais, les éprouvettes utilisées, les conditions de chargement et les méthodes expérimentales mises en œuvre sont détaillées.

Le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux. Nous présentons d'abord la durée de vie et le suivi du processus d'endommagement pour les différents essais. Ensuite nous décrivons, par analyse micrographique, les mécanismes de fissuration et d'endommagement sur la surface du contact. Les résultats (durée de vie, paramètres de fretting fatigue, caractéristiques d'endommagement, sites de l'amorçage,...) sont étudiés en fonction du nombre de cycles.

Le quatrième chapitre présente les résultats de l'analyse numérique. Nous présentons les champs de contraintes, de déplacements et de déformations sur l'éprouvette. Une attention particulière est portée sur les zones critiques à savoir : le bord du trou et la zone frontière du contact.

La cinquième partie présente l'analyse faite à partir de la Carte du Réponse du Matériau. Celle-ci nous permet de décrire les phénomènes d'amorçage, le champ de l'endommagement au voisinage de contact. L'effet de effort normal sur la durée de vie en fretting –fatigue est étudié à partir des courbes de Wöhler.

Enfin, une conclusion générale permet de faire une synthèse des résultats expérimentaux et numériques obtenus et d'apporter des éléments de réponses à la problématique de cette étude.

I. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction

Les alliages d'aluminium sont, grâce à une résistance spécifique satisfaisante et de bonnes caractéristiques mécaniques, largement utilisés dans les structures de transport: non seulement dans l'industrie aéronautique, mais aussi de plus en plus pour les transports terrestres (rail et route). Mais ces alliages présentent quelques inconvénients, par exemple, leur comportement délicat en soudage et certaines difficultés d'assemblages (rivetage et boulonnage). Les assemblages par rivetage ou boulonnage représentent encore la majorité des liaisons et des points faibles (amorçage) des structures. L'étude de l'impact de ces jonctions sur la durée de vie fonctionnelle des alliages d'aluminium devient prépondérante.

Généralement le terme "fretting" désigne un processus de dégradation superficielle qui apparaît entre deux surfaces en contact animées d'un mouvement oscillatoire de faibles amplitudes (de quelques microns jusqu'à quelques centaines de microns). Ce mode de dégradation est présent toujours dans les liaisons boulonnées et rivetées, soumises à un champ de vibrations et chargement en service. La dégradation de l'état de surface joue un rôle important dans la diminution de la résistance à la fatigue de l'assemblage. L'action conjuguée du fretting et de la fatigue peut introduire une réduction de la résistance à la fatigue d'un facteur allant de 2 à 5 [1]. Dans ces conditions, des fissures de fatigue peuvent s'amorcer et même se propager à un niveau de contrainte très inférieur à la limite de fatigue des matériaux qui peut finalement conduire à la rupture des pièces. Ce phénomène s'appelle « fretting - fatigue ». Celui-ci est un des modes essentiels de l'endommagement de matériaux d'un assemblage par rivetage ou boulonnage.

Pour étudier le comportement en fretting - fatigue, de nombreux travaux ont été réalisés pour des sollicitations différentes représentatives des sollicitations des structures industrielles. Selon les conditions de sollicitation nous pouvons identifier 4 modes d'endommagement, comme l'indique le Tableau (1.1).

Chargement Sollicitation	Chargement contact	Chargement volumique fatigue	Chargement volumique statique	déplacement relatif par système extérieur
1) Fretting - usure	OUI			OUI
2) Fatigue pure		OUI		
3) Fretting -usure sous contrainte	OUI		OUI	OUI
4) Fretting -fatigue	OUI	OUI		

Tableau 1.1 Chargement et modes d'endommagement

Dans ce tableau, nous notons que le premier et deuxième mode de sollicitation seulement comportent un seul mode de chargement, soit fretting soit fatigue. Étudier le comportement des matériaux sous un seul mode de chargement permet de mieux connaître les mécanismes d'endommagement liés soit au fretting soit à la fatigue. Les troisième et quatrième types d'essais étudient l'endommagement sous sollicitations complexes : fretting–usure sous contrainte et fretting-fatigue. Ceci permet d'appréhender les modes d'endommagement sous sollicitations combinées.

Dans cette partie, nous présentons respectivement un aperçu pour chaque type d'essais. En particulier, nous précisons et analysons les méthodes et les résultats d'essais.

1.2 Fretting usure

1.2.1 Description des essais

Pour ce type d'essai, l'endommagement résulte d'une sollicitation mécanique oscillatoire de contact, c'est à dire sans influence de la fatigue. Le fretting-usure est quelquefois considéré comme un sous domaine de la fatigue de contact. Une configuration typique de ce type d'essais est illustrée par la (Figure 1.1). L'échantillon est un plan maintenu fixe, sur lequel un contre-corps est mis en contact via une force

normale au plan, celui-ci est mis en mouvement relatif de faible amplitude par un système extérieur. Les déplacements s'échelonnent typiquement depuis quelques microns jusqu'à quelques centaines de microns.

La (figure 1.1) présente le contact cylindre-plan. Celui-ci est souvent lié à l'étude de la fissuration car on peut alors formaliser le chargement en deux dimensions et développer des modèles numériques par éléments finis.

Un autre mode de chargement est le contact sphère-plan, qui est privilégié dans l'étude de l'usure car il est facile à mettre en œuvre et permet un contact continu. Le troisième mode de chargement est le contact plan-plan, qui se rapproche le plus des situations réelles et permet de maintenir les surfaces de contact constantes. Mais il est peu utilisé pour l'étude du fretting - usure à cause des difficultés d'alignement qui peuvent conduire à des concentrations de chargement. (Figure 1.2).

Souvent utilisé pour étudier l'usure ce type d'essais peut néanmoins induire l'amorçage et engendrer une fissuration très profonde. Ces essais permettent de caractériser l'initiation de la fissuration induite par la sollicitation du contact seul. L'influence des paramètres de chargement (effort normal, débattement, coefficient de frottement) est plus facilement identifiée et calculée.

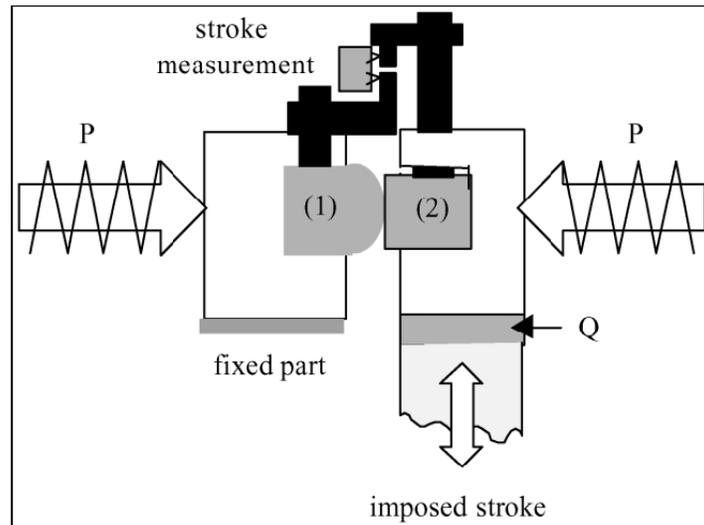


Figure 1.1 : Schéma de figuration l'essai de fretting usure [2]

Et avec les valeurs de ces paramètres (effort normal, débattement, coefficient de frottement), il est possible de dresser la *carte fretting* (voir figure 1.4....)- un diagramme

qui représente les domaines relatifs par deux variables (e.g. déplacement, amplitude et fréquence...), avec les frontières entre les domaines représentent les valeurs de seuil de transfert d'une à l'autre. La carte de fretting est un moyen classique d'étude du fretting.

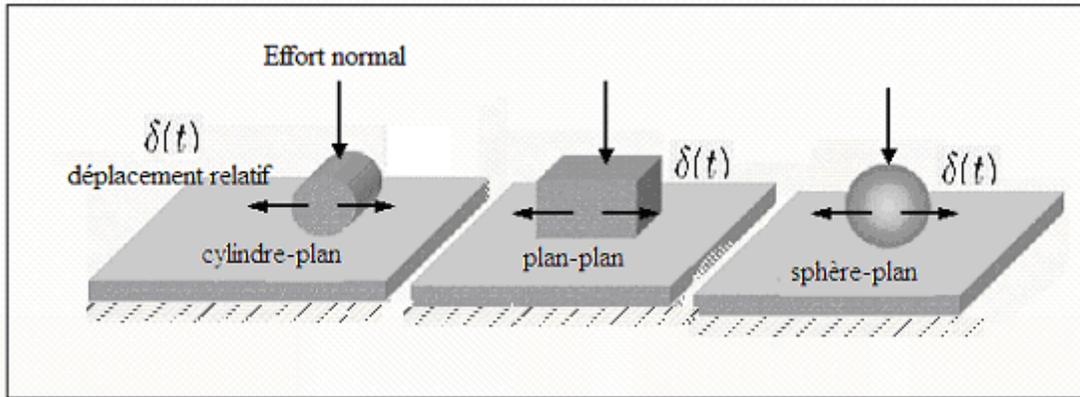


Figure 1.2 les trois types de contact

1.2.2 Carte de sollicitation et l'amorçage de fissures sous sollicitation de fretting

Les premières études sur le sujet de fretting ont été réalisées par Eden et al. et Tomlinson [3] qui s'intéressent aux débris d'oxydes de fer entre deux éprouvettes d'acier. Dès lors, depuis presque un siècle, les recherches s'accélérent et des efforts considérables ont été faits pour mieux connaître les mécanismes de dégradation par fretting. La carte de fretting introduite par Vingsbo et Söderberg [4] a permis une représentation plus explicite de l'endommagement. A partir de cette représentation et en introduisant la notion de *bûche de fretting*, qui est le tracé temporel du cycle de fretting ($Q(t), t$) (voir figure 1.3), Viencent [5] intègre l'évolution des conditions de glissement dans le temps et définit les trois domaines de fretting (fig 1.4):

On peut définir 3 conditions de glissement :

- la condition de glissement partiel constant,
- la condition de glissement total constant,
- la condition de glissement mixte qui caractérise le passage de l'une à l'autre de ces conditions.

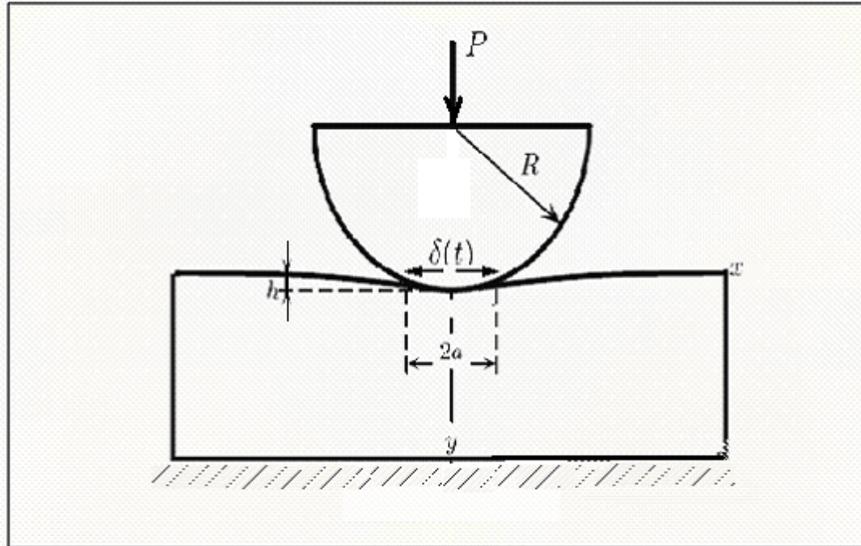


Figure 1.3 Vue schématique d'un contact de fretting, l'indentation du contre-corps par l'effort normale P et le mouvement alternatif des surfaces (déplacement δ) génèrent la sollicitation de fretting

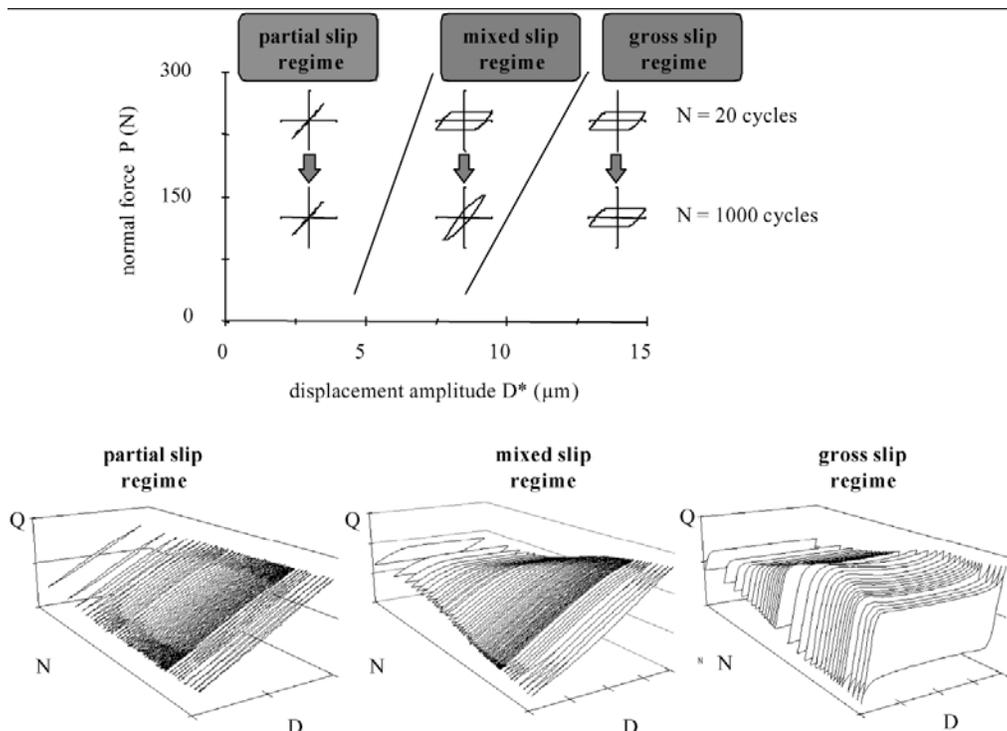


Figure 1.4 Définition des régimes de fretting. [2]

Pour quantifier la frontière entre les régimes de glissement, Fouvry [6], formalise des critères d'identification de la condition seuil de glissement (cf. figure 1.5). Ces critères se basent sur une analyse différentielle des variables associées au test de fretting au cours de l'essai. Ils sont au nombre de trois:

- un critère énergétique A, lié à l'énergie dissipée par le contact
- un critère d'ouverture de cycles B
- un critère indépendant du montage C

Cette approche systématique est très utile pour déterminer les différents régimes et permet de comparer des matériaux entre eux

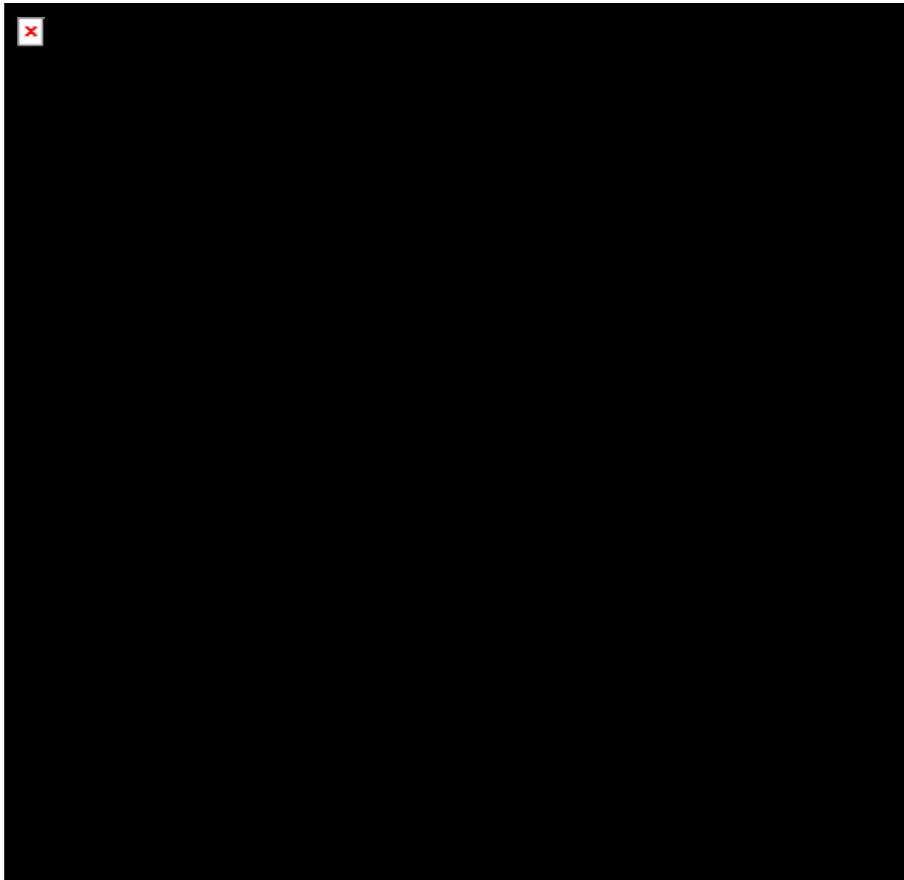


Figure 1.5 Critères de quantification de la condition de glissement d'après Fouvry. [6]

Carte de réponse du matériau

Concernant la dégradation et la fissuration des matériaux dans les essais fretting, Blanchard et al. (1991) [7] introduisent une carte de réponse du matériau associée à la carte de sollicitation. Par cette carte, la dégradation et la fissuration des matériaux sont

liées directement avec la nature de la sollicitation. (Effort normal et déplacement). Cette approche facilite la prédiction des conditions d'amorçage d'une fissure.

La Figure 1.6 montre la synthèse de l'approche globale en utilisant une carte de réponse du matériau:

- L'espace de sollicitation (chargement versus déplacement) est décomposé en trois régimes de glissements associés à des formes de bûches caractéristiques.

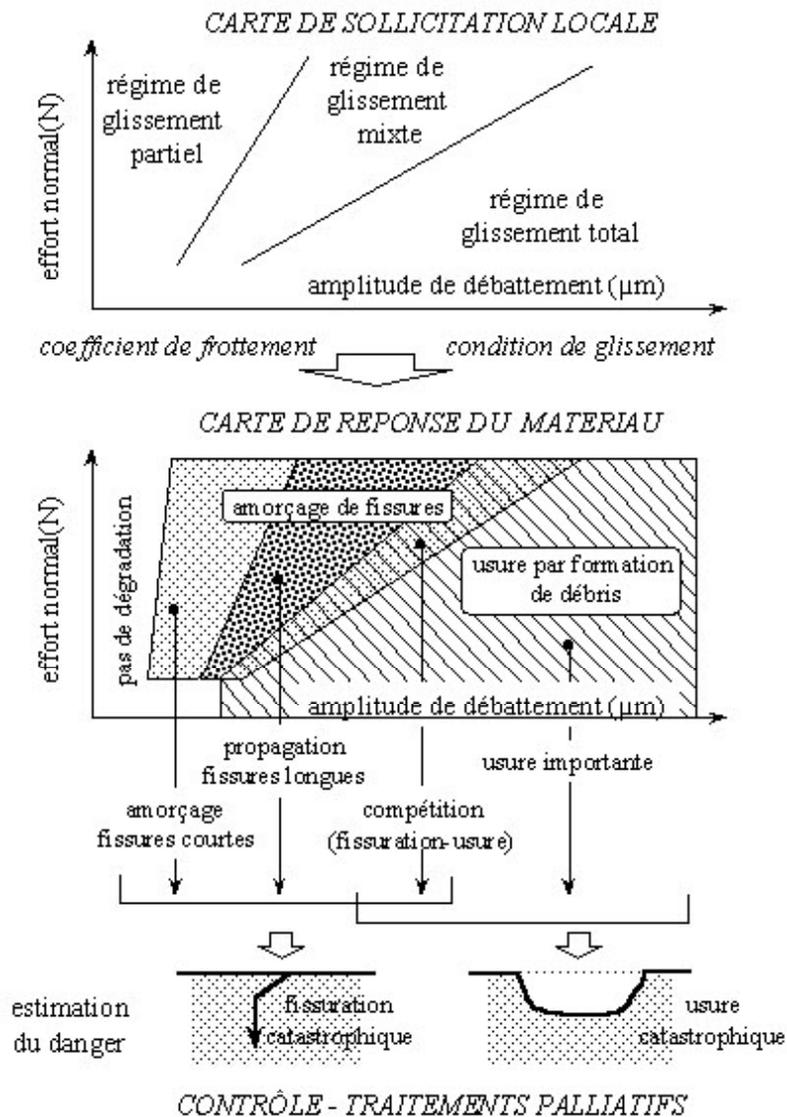
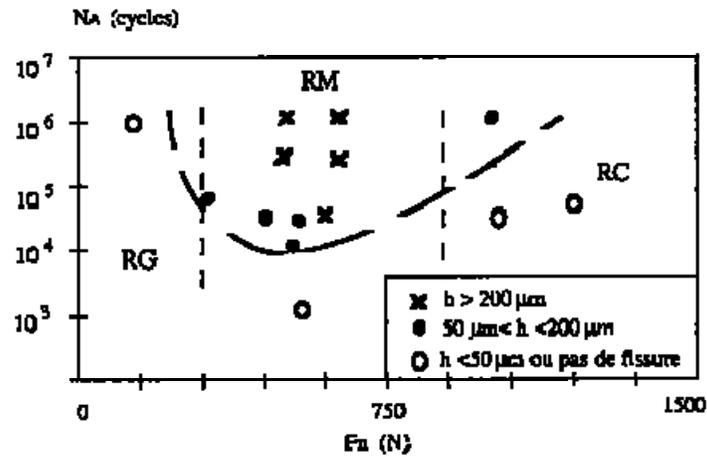


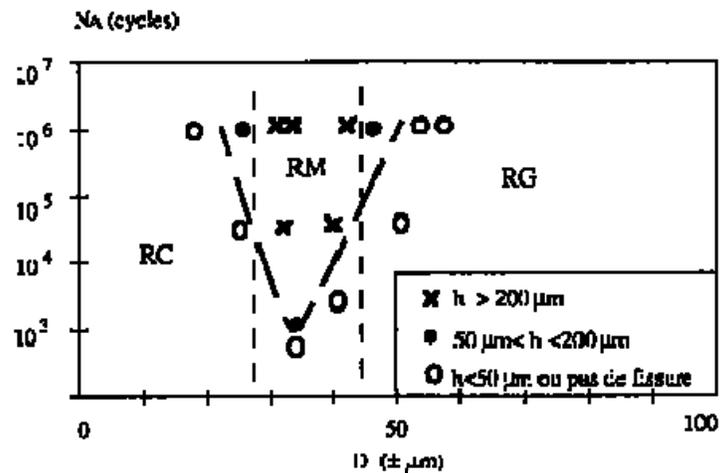
Figure 1.6 Approche en termes de cartes de sollicitations locales et des dégradations [8]

Ces trois régimes fournissent les différentes réponses du matériau. On peut voir que la fissuration et la formation de débris sont la dégradation prépondérante respectivement

en régimes de glissement mixte et total. Dans le régime de glissement partiel, il a aussi d'amorçage de fissures courtes (de quelques dizaines de microns). D'après la carte de réponse du matériau, l'augmentation importante de l'effort normal ou du déplacement dans un test de fretting peut faire passer d'une condition de fissuration à une condition de non fissuration.



(a)



(b)

Figure 1.7 L'extension du domaine de fissuration:

a) Versus sur l'augmentation de sollicitation : effort normal;

b) Versus l'amplitude du déplacement ($F_n = 1000 \text{ N}$).

Dans les travaux de Zhou [9], l'auteur complète l'analyse en étudiant l'extension du domaine de fissuration en fonction du nombre de cycles (figure 1.7) et les résultats confirment que l'augmentation importante de l'effort normal ou du déplacement dans un test de fretting peut faire passer d'une condition de fissuration à une condition de non fissuration.

L'expertise des essais de fretting-usure montre que l'amorçage des fissures a toujours lieu dans la zone externe du contact avec un mode de multi-fissuration (figure 1.8). Pour essayer de rationaliser et de formaliser la condition d'amorçage de fissures, de nombreuses études sont complétées par une description des distributions des contraintes lors du contact [10, 11] ou par calcul analytique (notamment les contraintes de cisaillement) pour la géométrie de l'essai considéré suivi de l'application d'un critère multiaxial de fatigue [12, 13] (de Dang Van et Fatemi-Socie,...). Les auteurs montrent que pour calculer le champ de contraintes, la méthode des éléments finis est bien adaptée. Ces méthodologies permettent la prédiction du point d'amorçage et de l'angle d'amorçage de la fissure, mais se montrent inefficaces pour expliquer la capacité d'accommodation du matériau sous le contact. L'observation micrographique des surfaces dans le processus de fretting devient nécessaire.

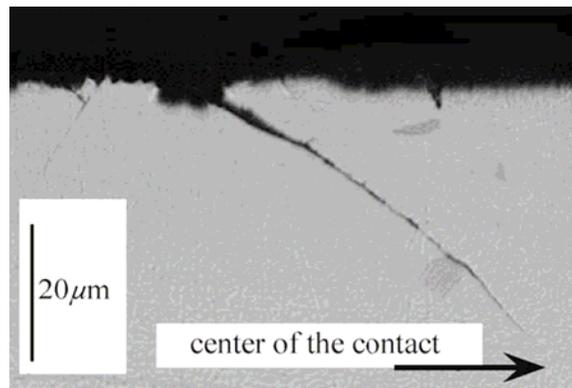


Figure 1.8 Fissuration de fretting usure (coupe transversale sous la surface) [14]

1.2.3 Propagation des fissures de fretting

Dans les essais de fretting usure, les fissures se propagent sous la seule influence du contact et sont responsables de la rupture finale d'échantillon. IL y a très peu de travaux sur la propagation des fissures de fretting. Les auteurs ayant étudié ce problème

supposent que la propagation est contrôlée par le facteur d'intensité de contrainte. Les travaux s'orientent sur les méthodes de calcul du facteur d'Intensité de contraintes. Ce travail dépasse le cadre de ce mémoire.

1.2.4 Mécanisme de fretting et approche troisième corps

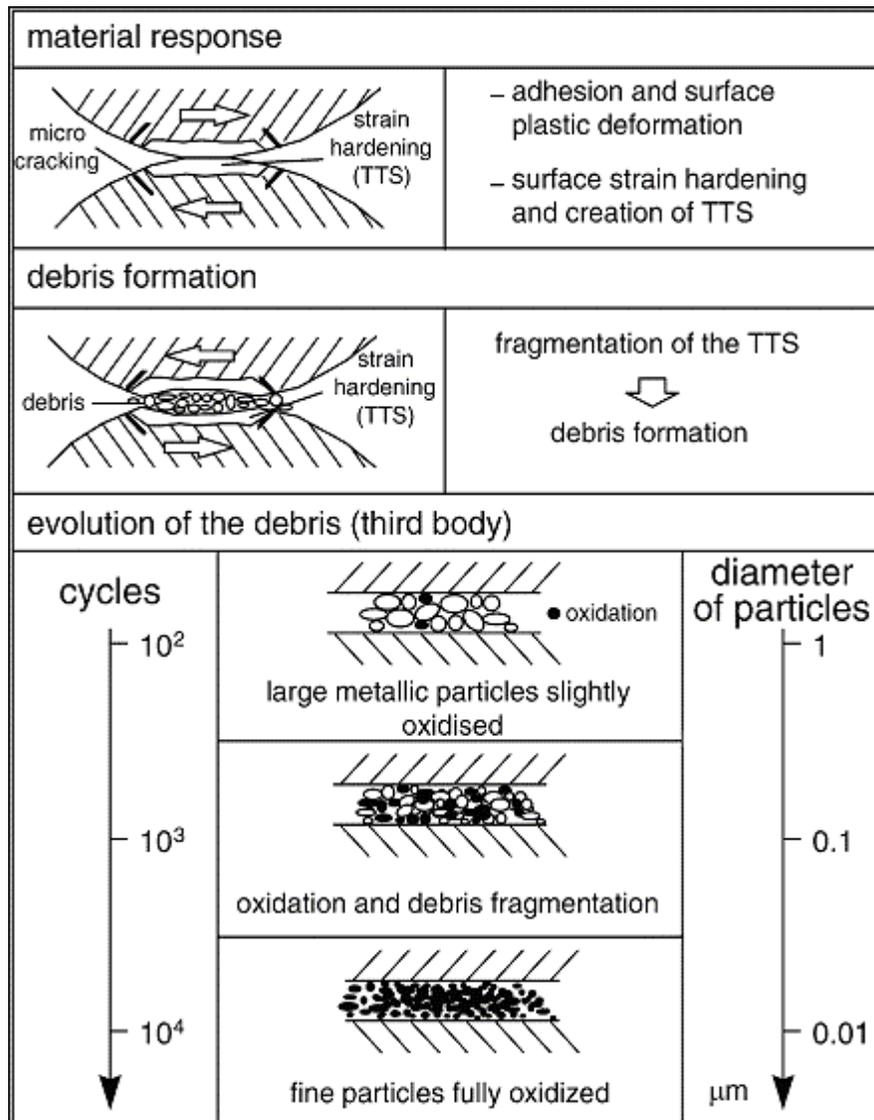


Figure 1.9 Genèse et transformation du troisième corps [15]

La carte de sollicitation et la bûche de fretting présentent l'évolution de paramètres de chargement pendant les essais. Pour interpréter le mécanisme de cette évolution, quelques modèles basés sur les observations microscopiques et sur les analyses du matériau ont été établis, et parmi ceux-ci l'approche « troisième corps » semble plus

proche de la réalité physique et se met facilement en évidence expérimentalement.

La figure 1.9 montre les processus de dégradation de matériau sous fretting usure d'après l'approche de troisième corps. Dans ce modèle, la formation de TTS (Tribologically Transformed Structure) (Figure 1.10) est considérée comme la première étape de formation du troisième « corps – couche » qui va jouer un rôle de séparateur entre les deux surfaces en contact dans le processus de dégradation. Cette transformation tribologique des matériaux induite par la déformation plastique et l'écrasement de la surface génère une structure nanocristalline très dure, fragile, qui est observée entre les couches de débris et la zone plastique du matériau.

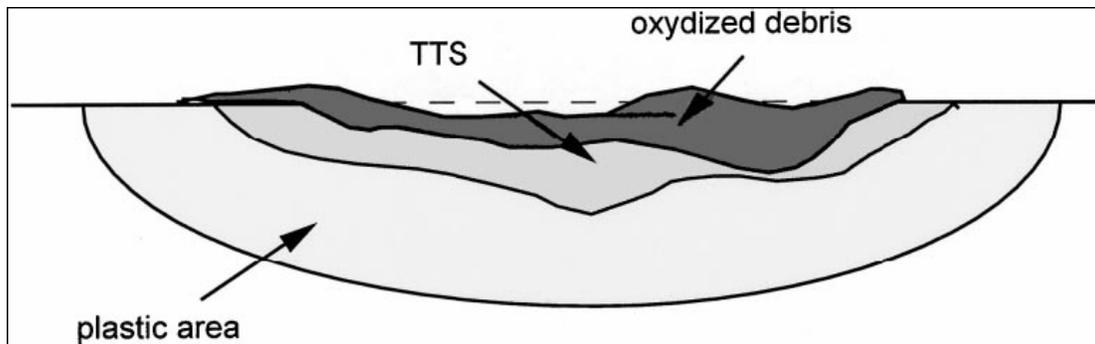


Figure 1.10 (a) Structure tribologique d'une section lors du fretting.

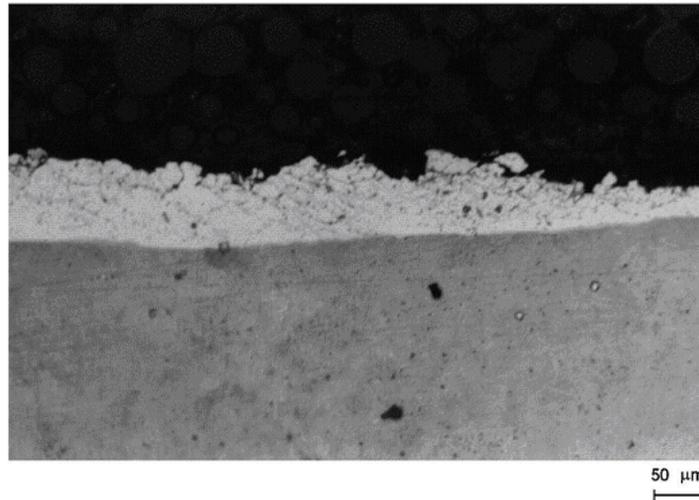


Figure 1.10 (b) Observation de la TTS sur une section transversale [15]

La formation de la « TTS » est très rapide, moins de 10 cycles suffisent pour noter sa

première localisation et moins que 1000 cycles peuvent suffire à la formation d'une couche stable de TTS pour un grand nombre d'essais. La Figure 1.11 présente la carte de sollicitation pour les premiers 10 cycles lors d'un essai de fretting usure, ce qui correspond à l'étape de formation de la TTS. Pendant le processus de formation, la couche résultant de la TTS est en même temps écrasée et fragmentée donnant lieu à la formation de débris. Dans les travaux de E.Sauger [15], l'auteur montre que pendant l'étape stabilisée de fretting usure, la couche résultant de la TTS reste constante. (figure 1.12). Ceci implique que le taux de transformation du domaine plastique à TTS est égal à celui de destruction de TTS en débris sur la face de fretting.

Avec la formation et l'évolution continuent de débris, une couche stable de débris, le troisième corps, est établie entre les deux premiers corps. Ce troisième corps participe au transfert des chargements et protège indirectement les premiers corps de la dégradation. Le fretting - usure entre dans une étape stabilisée. La formation du troisième corps correspond au processus d'accommodation du matériau avant l'étape stabilisée de fretting.

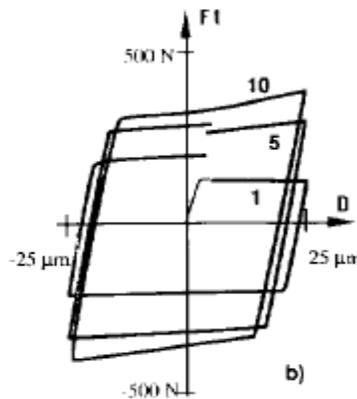


Figure 1.11 Ft-D courbe pour les 10 premiers cycles de fretting ($F_n=500\text{ N}$, $D=\pm 25\text{ }\mu\text{m}$; Al-Li [16])

L'approche « troisième corps » interprète bien le fait que la fissuration apparaît dans le régime de glissement partiel et mixte, mais pas dans celui du glissement total. Dans les conditions de glissement partiel et mixte, la formation de débris n'est pas importante et la quantité de débris éjectée est faible. La formation de troisième corps ne s'active pas et il n'y a pas de protection entre les premier corps. Par conséquence, à mesure que le

fretting continue, les fissures peuvent s'amorcer. Par contre, dans la condition de glissement total, la formation de débris est importante et la quantité de débris suffit à la formation du troisième corps. Ce troisième corps sépare les premiers corps et les protège indirectement. Dans ces conditions il n'y a pas d'amorce de fissure.

Bien que le troisième corps ne se forme pas dans les conditions de glissement partiel et mixte, la couche résultant de la TTS peut jouer un important rôle dans le mécanisme d'accommodation du matériau, notamment dans les premières étapes du fretting.

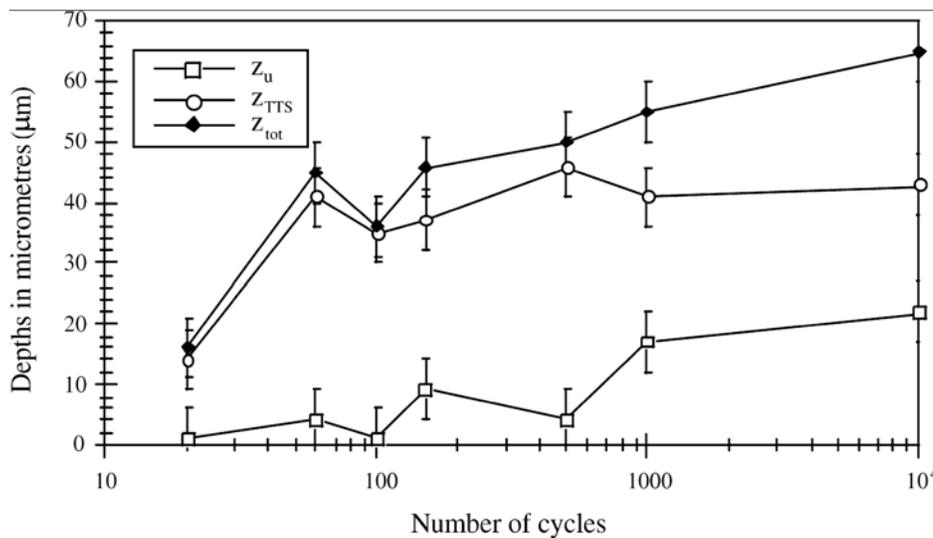


Figure 1.12 Variation de Z_{tot} (L'épaisseur totale), Z_{TTS} (l'épaisseur de TTS resté), Z_u (l'épaisseur de TTS transféré) vs. Nombre de cycles pour un acier (35NiCrMo16) (\square l'ensemble 25 mm, 500 N, 5 Hz). [15]

1.2.5 Facteurs influençant le fretting usure

Les facteurs les plus souvent considérés dans les études de fretting usure sont

- L'amplitude du déplacement relatif des surfaces en contact (D)
- Le coefficient de frottement (μ)
- L'effort normal (ou la pression de contact) (F_n);
- L'effort tangentiel (F_t)
- L'état de surface dans le contact (rugosité R_t);
- La fréquence de sollicitation et la forme du signal (f);
- Le nombre de cycles de fretting;

- Les différences de propriétés des matériaux ;

Afin d'étudier l'influence de ces facteurs sur le fretting usure, Zhou et al [16] ont réalisé des essais sur des alliages d'aluminium. Ils ont ensuite comparé l'évolution des différentes étapes (début et étape stabilisée) durant le fretting usure. Des résultats intéressants ont été mis en évidence, les figures de 1.13 à 1.18 montrent le début des essais (1-10cycles) et la figure 1.19 montre l'étape stabilisée.

- Effet de l'amplitude du déplacement D

La Figure 1.13 montre que l'effort tangentiel F_t et le coefficient de frottement μ augmentent légèrement et restent stables avec l'accroissement de l'amplitude du déplacement D. Ce phénomène peut être expliqué par le modèle à trois corps: quand l'amplitude du déplacement est petit, le glissement est partiel ou mixte, l'effort tangentiel augmente avec la croissance de l'amplitude du déplacement; quand l'amplitude du déplacement atteint une certaine valeur le régime de glissement total apparaît avec la formation du troisième corps. Le glissement se poursuit entre le premier et le troisième corps. L'effort tangentiel reste alors constant.

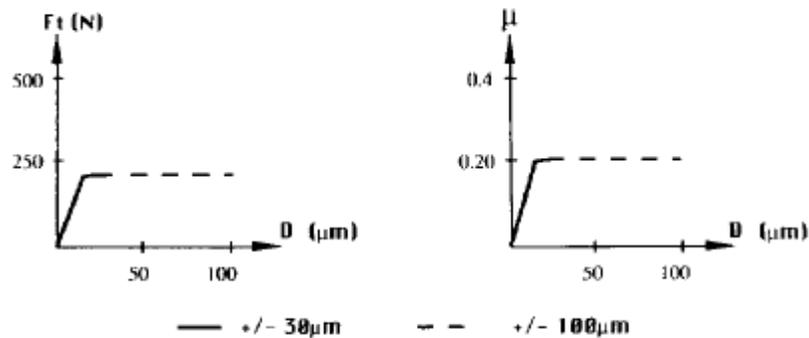


Figure 1.13 Variation de l'effort tangentiel F_t et du coefficient de frottement μ sur l'amplitude du déplacement pour le cas d'un alliage de Al-Li , $F_n=500$ N, $f=1$ HZ, $R_t=0.4\mu\text{m}$

- Effet de la rugosité

La figure 1.14 montre que l'effort tangentiel F_t et le coefficient de frottement μ doublent quant la rugosité des surfaces de contact passe de $0.4 \mu\text{m}$ à $4\mu\text{m}$.

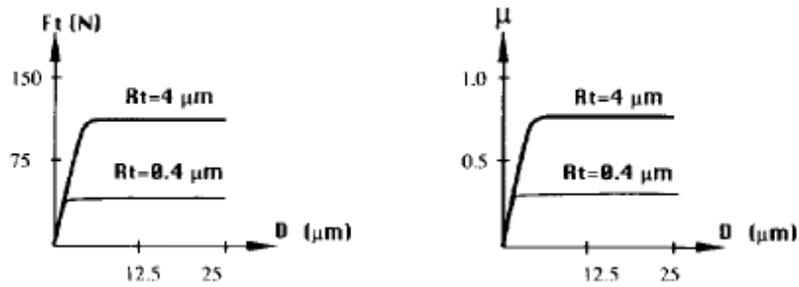


Figure 1.14 L'influence de la rugosité sur l'effort tangentiel F_t et sur le coefficient de frottement μ : Alliage de Al-Li, $F_n=150$ N, Déplacement $D=\pm 25$ μm

- L'évolution du coefficient de frottement μ avec le nombre de cycles de fretting,

La figure 1.15 a) et b), montre que le coefficient de frottement μ commence par augmenter avec le nombre de cycles pour ensuite se stabiliser (il atteint une valeur constante autour de mille ou quelques milliers cycles).

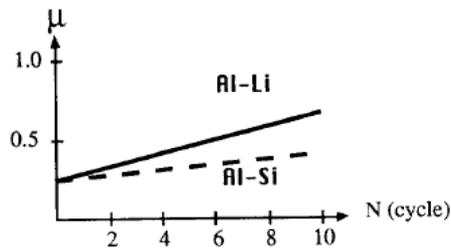


Figure 1.15 a) Variation du coefficient de frottement μ avec le nombre de cycles fretting.

$F_n=500$ N, $D=\pm 25$ μm

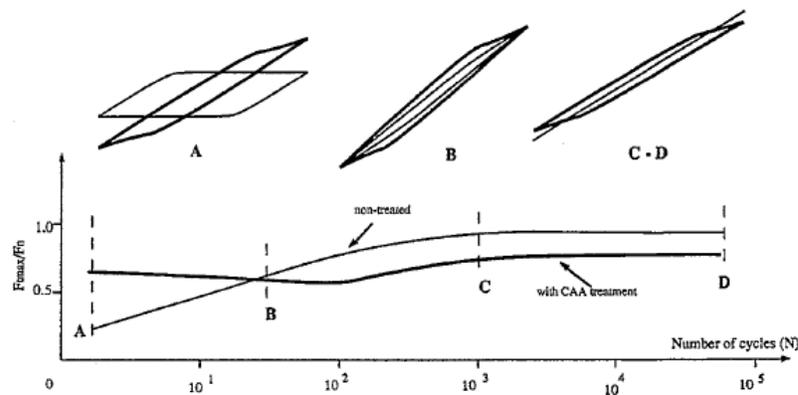


Figure 1.15 b) Influence du coefficient de frottement avec le nombre de cycles de fretting (sur alliages d'aluminium 2024T 351, CAA : acide chromique anodizing) [17].

- Effet de l'effort normal

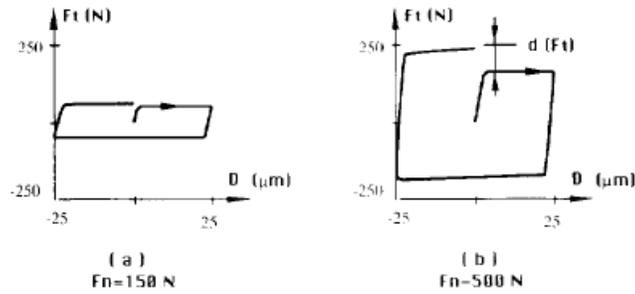


Figure 1.16 Influence de l'effort normal (a, b) sur la courbe F_t - D dans lors du premier cycle. Alliage de Al-Li , $f=1$ HZ, $D=\pm 25 \mu\text{m}$, $R_t= 0.4\mu\text{m}$

- Influence du matériau

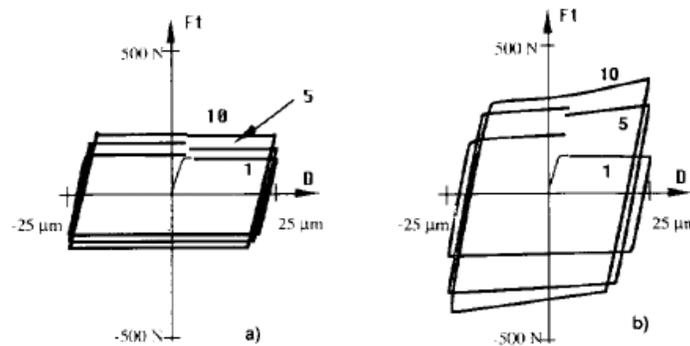


Figure 1.17 Les courbes de F_t - D pour les premiers 10 cycles, $F_n=500$ N, $D=\pm 25 \mu\text{m}$
Al-Si; (b) Al-Li

- Influence de la fréquence

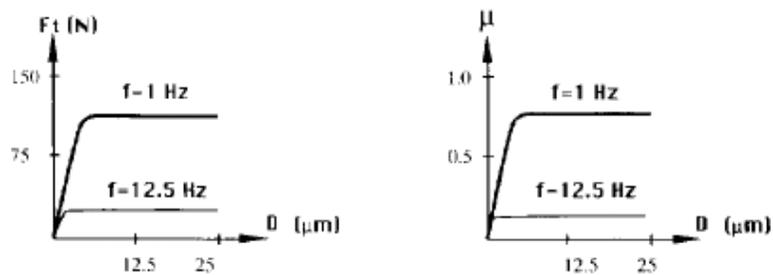


Figure 1.18 Influence de la fréquence sur l'effort tangentiel F_t et sur le coefficient de frottement μ . Alliage de Al-Li , $F_n=150$ N, $D=\pm 25 \mu\text{m}$; $R_t= 0.4\mu\text{m}$

Sur la figure 1.18, on remarque que le coefficient de frottement décroît de 0.7 à 0.15 quant la fréquence augmente de 1 Hz à 12.5 Hz. Pour la même vitesse de glissement, le coefficient de frottement pour les petites amplitudes ($10 \mu\text{m}$) avec une fréquence élevée (5 Hz par exemple) est différent de celui obtenu avec une grande amplitude ($50\mu\text{m}$) avec une fréquence basse (1Hz). L'auteur mentionne que l'accommodation du matériau semble dépendante de l'amplitude du déplacement et de la fréquence.

- Influence du déplacement et de la fréquence dans la région stabilisée

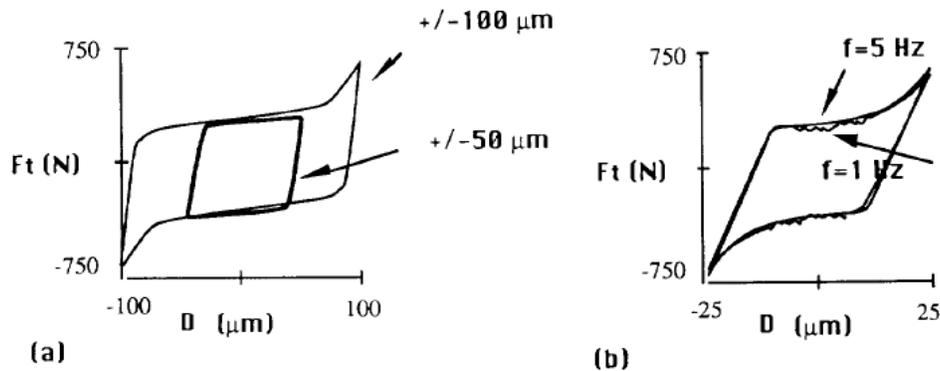


Figure 1.19 Influence de la fréquence et du déplacement sur les courbes F_t - D pour les deux alliages après 5×10^4 cycles.

- a) l'effet du déplacement D ,
- b) l'effet de la fréquence f .

Dans la région stabilisée, comme le montre la figure 1.19 (b), l'effet de la fréquence et du déplacement diminue fortement.

1.2.6 Méthode corrective pour le fretting usure

Pour pallier l'effet de fretting usure, bien des méthodes ont été développées: Traitement de surface [1], Traitement de normalisation [19], Lubrification [20] et Revêtement [17] Grenailage ..., introduit une contrainte résiduelle de compression sur la surface de matériau et retarde l'amorçage et la propagation de fissures, est largement adopté.

1.3 Étude de fretting usure sous contrainte

1.3.1 Fretting - usure sous contrainte (ou fretting - fatigue statique)

Ce type d'essai est identique à l'essai de fretting usure mais l'échantillon plan est préchargé par une contrainte volumique constante (figure 1.20). Cette configuration a été introduite pour évaluer l'influence d'une contrainte statique sur l'amorçage et la propagation de fissures. Des systèmes industriels tels que les câbles de ponts correspondent assez bien à ces conditions.

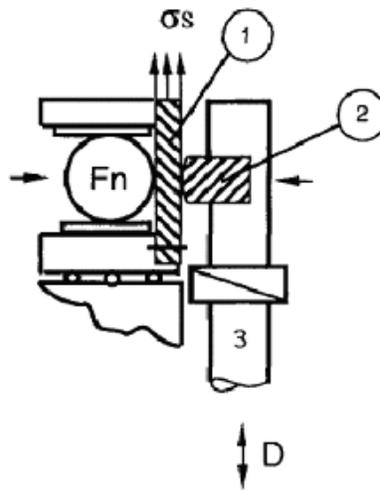


Figure 1.20 : Schéma de l'essai de fretting usure sous contrainte [17] (1 : échantillon, 2 contre-corps).

1.3.2 Influence de la contrainte statique sur le fretting -usure

Zhou et al [21] ont réalisé des essais sur des alliages d'aluminium et ont montré que l'application d'une contrainte statique oriente le domaine de fissuration vers les plus faibles amplitudes de déplacement dans la carte de réponse du matériau. Cette variation ne concerne pas les domaines des grandes amplitudes de déplacement (figure 1.21). Les auteurs mettent aussi en évidence une augmentation de la profondeur de fissuration avec la charge statique.

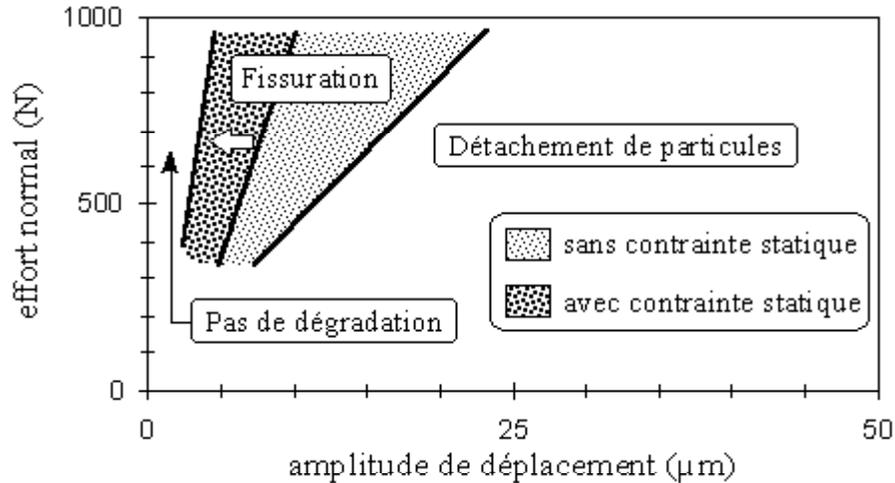


Figure 1.21: Influence de la contrainte statique de traction (200 MPa) sur l'extension du domaine de la fissuration à 10^6 cycles

Les travaux de P.Reyb et al. [17] sur des alliages d'aluminium ont conduit à des résultats très semblables. Il trouve que l'effort extérieur statique, indépendant de la carte de sollicitation locale, ne change pas la condition locale de fretting.

Une contrainte statique déplace le régime de fissuration vers la gauche dans la carte de réponse du matériau soit vers la zone de non dégradation.

Si une fissure apparaît elle peut conduire à une fracture de l'échantillon, ceci ne se produisant pas dans les essais de fretting-usure classique.

Grâce à un contrôle précis des paramètres, l'essai sous contrainte statique est un moyen efficace pour étudier le comportement dans la zone de passage du fretting - usure au fretting - fatigue

1.4 Fatigue pure

On entend par fatigue ou endommagement par fatigue la modification des propriétés des matériaux consécutifs à l'application de cycles de chargement, cycles dont la répétition peut conduire à la fissuration puis à la rupture des pièces.

1.4.1 L'essai de fatigue

L'endommagement par fatigue est un phénomène connu depuis le 19e siècle. Afin de

préciser les différents aspects de la fatigue des métaux, les chercheurs ont effectué des essais pour différentes sollicitations, généralement sur des éprouvettes de petites dimensions avec des sollicitations simples.

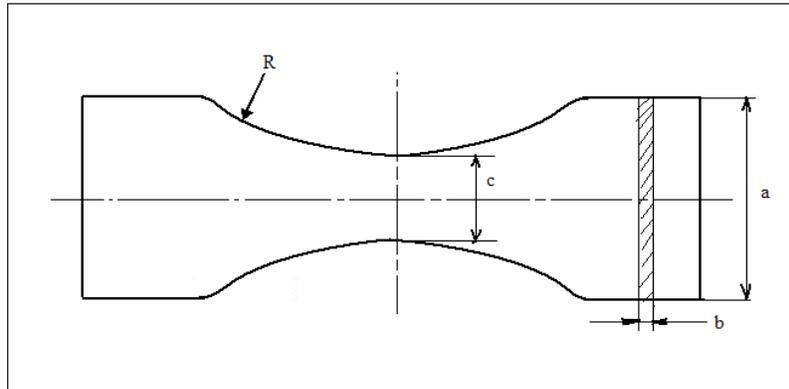


Figure 1.22 Géométrie d'une éprouvette typique pour l'essai de fatigue

Durée de vie en fatigue et courbes de Wöhler ou courbes S-N

La Figure 1.22 montre la géométrie usuelle d'une éprouvette pour un essai de fatigue. Avec cette géométrie la fissure s'amorce dans la zone centrale de l'éprouvette. Les essais sont classiquement réalisés avec un signal sinusoïdal en contrainte alternée, répétée ou ondulée (traction, torsion) avec une contrainte maximale inférieure à la limite d'élasticité. Les résultats pour différents niveaux de contraintes sont représentés dans un diagramme d'endurance, qui s'appelle aussi courbe S-N ou Courbe de Wöhler (figure 1.23).

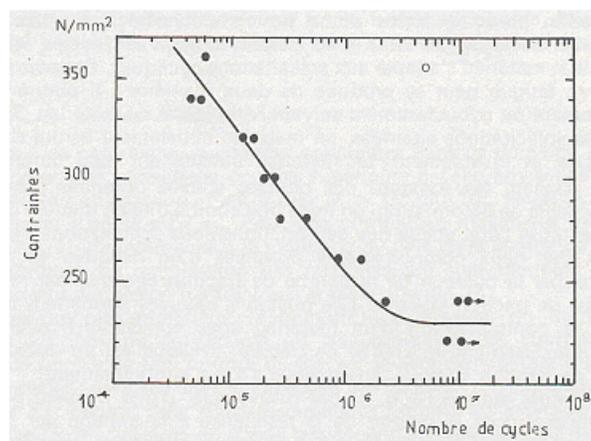


Figure 1.23 Courbe de Wöhler : nombre de cycles à rupture (en échelle logarithmique) en fonction de l'amplitude maximale de la contrainte périodique) Ex : acier doux en flexion plane. [22]

Sur cette courbe, on peut distinguer trois domaines:

- une zone de fatigue oligocyclique (bas nombre de cycles : $10^4 - 10^5$), sous forte contrainte et déformation plastique,

- une zone de fatigue (ou d'endurance limitée, polycyclique), où la rupture est atteinte après un nombre de cycles plus important (10^5-10^7), le nombre de cycles augmente lorsque la contrainte diminue.

- une zone d'endurance illimitée ou zone de sécurité, sous faible contrainte, pour laquelle la rupture ne se produit pas quelque soit le nombre de cycles (ou supérieur à la durée de vie envisagée pour la pièce : $10^7, 10^8$ ou plus). La valeur de la contrainte correspondant à la durée de vie illimitée est appelée limite de fatigue ou limite d'endurance.

- **Propagation de fissure**

Un autre paramètre important pour estimer la durée de vie d'une structure est la vitesse de propagation qui permet de calculer le nombre de cycles pour que la fissure atteigne une longueur critique.

Une géométrie classique de l'éprouvette de mécanique de la rupture, utilisée pour étudier la propagation d'une fissure, est représentée sur la figure 1.24. Une micro fissure préexiste dans le fond de l'entaille, cet essai de fatigue ne tient pas compte de l'amorçage mais permet étudier la relation de la vitesse de propagation de fissure (da/dN) et le niveau de contrainte (ou du Facteur d'Intensité de contrainte)

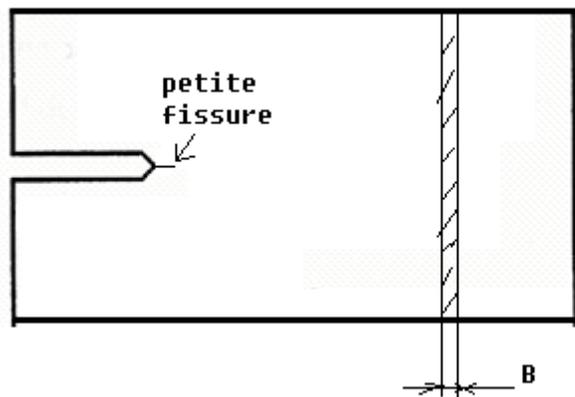


Figure 1.24 Géométrie de l'éprouvette avec une entaille. Type CT (Compact Tensile)

- **Composant de la durée de vie de fatigue**

On peut décomposer la durée de vie de fatigue, notée n_f , en trois parties principales correspondant aux trois phases d'endommagement:

la durée d'amorçage de microfissure n_a ,

la propagation de fissure courte n_{pc} ,

la propagation de fissure longue n_{pl} , comme que la fig. 1.25 montre.

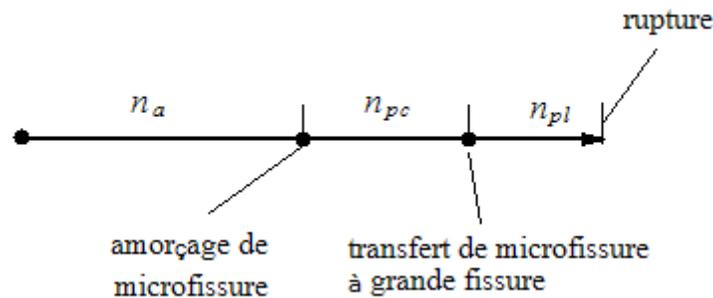


Figure 1.25 Les 3 stades de la durée de vie en fatigue

soit

$$n_f = n_a + n_{pc} + n_{pl} \quad (1.1)$$

Une description détaillée des différentes phases et sera donnée dans ce qui suit.

1.4.2 Amorçage des microfissures de fatigue

Sites d'amorçage

- Dans certains métaux, les bandes de glissement conduisent à l'apparition de microfissures par le mécanisme des intrusions-extrusions.

- Tous les matériaux contiennent des défauts, irrégularités de surface, inclusions à l'origine des concentrations locales de contraintes et constituant autant de possibles sites d'amorçage. Surtout, la présence d'inclusions en sous couche, proche de la surface, conduit à une concentration de contrainte locale très élevée qui peut amener la rupture rapide de la couche de métal entre l'inclusion et la surface formant une microfissure (ou longue fissure directement) particulièrement dangereuse (figure.1.27).

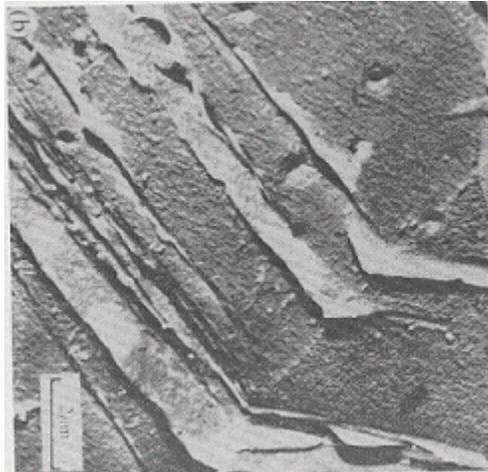


Figure 1.26 Intrusion et Extrusion sont associées à des bandes de glissement. [23].

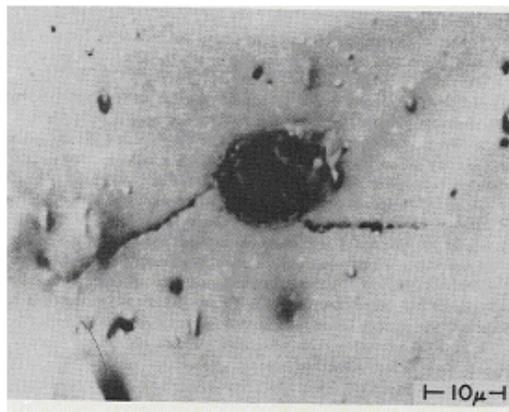


Figure 1.27 Amorçage, à partir d'une inclusion, d'une fissure de fatigue en surface dans un alliage d'aluminium. [23]

- Dans une structure réelle, les discontinuités géométriques ne peuvent généralement pas être évitées et sont responsables de «l'effet d'entaille» générant une concentration locale des contraintes constituant ainsi des sites privilégiés d'amorçage.

- Sur une éprouvette lisse, sans entaille (figure 1.22), l'amorçage dépend plutôt de l'état de surface du matériau (inclusions, rugosité,...) et présente un comportement aléatoire. Cet aspect aléatoire introduit une difficulté dans la prédiction précise de la durée de vie de fatigue.

1.4.3 Propagation des microfissures (ou le stade I de propagation des fissures)

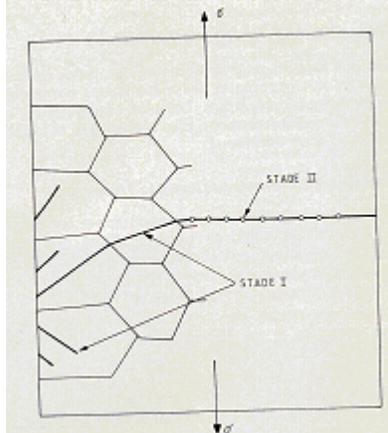


Figure 1.28 Schéma de l'initiation et de propagation de fissure de fatigue [23]

L'amorçage de la microfissure est suivi, en général, d'une propagation transgranulaire dans une direction cristallographique définie, de même lorsque l'amorçage est intergranulaire (figure 1.28). Ce stade est le stade I de la propagation de la fissure ou la propagation de fissure courte.

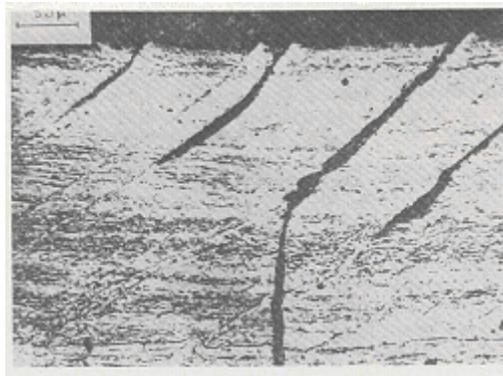


Figure 1.29. Photo de la microfissures et propagation. [23]

Le stade I est caractérisé par une accélération rapide de la vitesse au début de la propagation, mais celle-ci diminue avec la croissance de la fissure, et atteint une valeur constante comme durant le stade II (fissure longue). Cette transition entre stade I et stade II est attribuée à la diminution de la contrainte de cisaillement avec la croissance de la fissure et à l'augmentation concomitante de la contrainte normale.

La longueur de la fissure dans le stade I est de l'ordre de quelques dizaines de micromètres et correspond à la longueur de quelques grains (figure 1.29). Malgré une très

faible longueur de fissure au stade I, celui-ci représente une part importante de la durée, qui peut aller de 40 à 99% de la durée de vie totale en fatigue.

Le stade I n'existe pas toujours. En effet, la fissure peut s'amorcer directement en stade II, par exemple en présence de grosses inclusions, ou pour le cas d'un usinage grossier conduisant à des stries aiguës.

L'étude numérique du stade I de la propagation de fissure ne permet pas de décrire un modèle prédictif pour la durée de vie (nombre de cycles). La phase d'amorçage ne peut pas, non plus, être modélisée de façon prédictive précise.

Plusieurs chercheurs proposent de considérer les deux stades comme n'en faisant qu'un seul, avec un seuil d'amorçage d'environ 0.5 mm correspondant à une détection facile lors des essais.

1.4.4 Propagation des fissures longues (ou le stade II de la propagation)

- **Loi de Paris**

En 1963, Paris et Erdogan proposaient une loi permettant de prévoir la durée de vie en propagation. Ils montrèrent que la vitesse de propagation pouvait s'écrire sous la forme :

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^m \quad (1.2)$$

où :

K facteur d'intensité de contrainte, a longueur de fissure, C et m des paramètres matériau.

Cette relation correspond à la phase (B) sur la figure 1.30. Mais elle ne décrit pas le comportement de la fissure près de la rupture Kc ou du seuil de propagation ΔK_{th} . Le grand avantage de cette relation est avec deux paramètres matériau C et m on peut exprimer la vitesse de propagation et par suite la durée de vie en propagation.

- **Direction de la propagation**

Comme le montre la figure 1.28, durant le stade II, la fissure se propage perpendiculairement à la plus grande contrainte jusqu'à l'instabilité. La rupture finale se produit par un cisaillement statique dans une direction à 45°. Ce processus se produit rapidement généralement en moins de mille cycles.

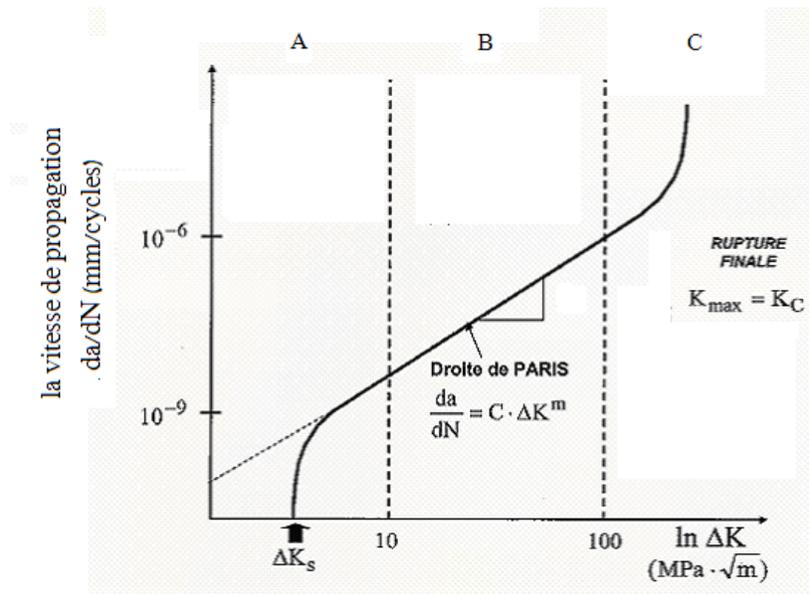


Figure 1.30 La vitesse de propagation de fissure en fonction du facteur d'intensité de contrainte. Trois domaines peuvent être identifiés région:

- A = faible vitesse de fissuration (seuil),
- B = régime intermédiaire (relation de Paris),
- C = haute vitesse de fissuration (K_C).

1.4.5 Amélioration de la durée de vie de fatigue : Perçage et Expansion

Pour diminuer l'acuité d'entaille on peut percer un trou en fond de fissure (figure 1.32). La fissure s'amorce au bord de trou à cause de la concentration de contrainte mais pour un nombre de cycles plus important. On peut améliorer la durée de vie par une expansion du trou (cold working). On introduit alors des contraintes résiduelles de compression qui retardent l'amorçage et ralentissent la propagation de la fissure (figure 1.31). Cette technique est aussi utilisée pour arrêter la propagation. Il faut alors optimiser le diamètre du trou (acuité) et le degré d'expansion.

La figure 1.33 montre qu'après expansion la durée de vie peut être accrue d'un facteur 10 fois par rapport aux éprouvettes sans expansion. Pour l'alliage d'aluminium 6068, l'optimum a été atteint avec un degré de expansion de 4.4% [24].

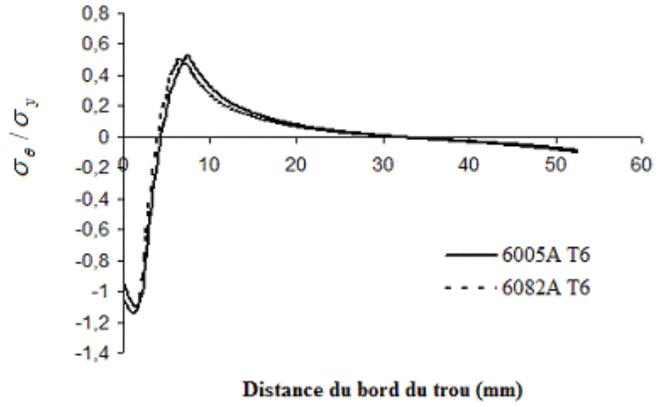


Figure 1.31 Contraintes résiduelles circonférentielles normalisées (σ_θ / σ_y)

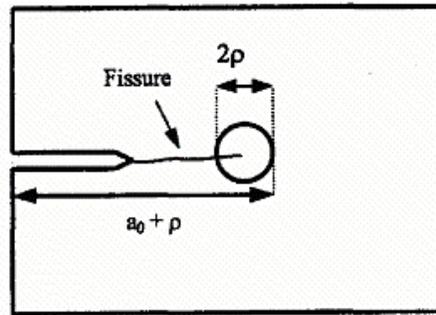


Figure 1.32 Schéma du perçage au fond de la fissure

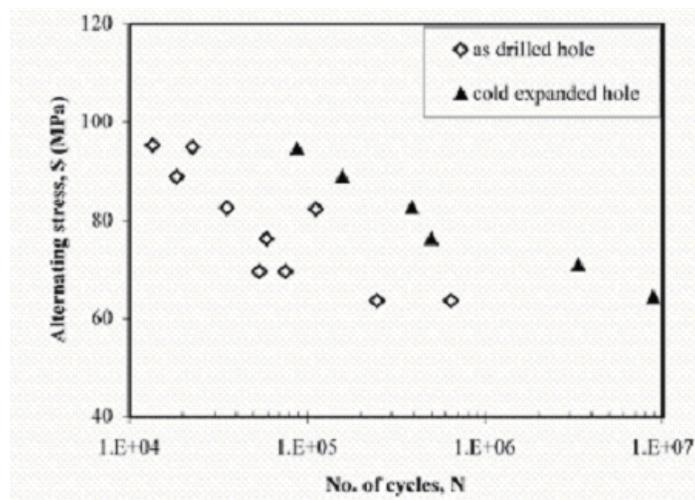


Figure 1.33 Courbe S-N des résultats expérimentaux de fatigue

Les contraintes résiduelles circonférentielles σ_θ sont normalisées par la limite d'élasticité σ_y à partir du bord du trou pour les deux alliages d'aluminium (diamètre final du trou $D=6\text{mm}$, et le degré d'expansion $DE=4.3\%$).

1.5 Étude du fretting - fatigue

1.5.1 Description des essais de fretting fatigue

Dans ces essais, l'endommagement résulte des deux sollicitations: contact et fatigue. Une éprouvette de traction est soumise à une sollicitation uniaxiale de fatigue. Sur la face de l'éprouvette, le contact résulte d'un système de contre-corps ajusté avec un dispositif de serrage comme l'indique la figure 1.34. C'est la déformation de l'éprouvette sous l'action de la contrainte de fatigue va induire le déplacement relatif des surfaces en contact, la mesure de la force de serrage permet d'estimer le coefficient de frottement. Cet essai permet de quantifier l'influence du contact sur la durée de vie en fatigue. Le déplacement des courbes de Wöhler permet d'estimer ainsi la réduction de la durée de vie résultant du contact.

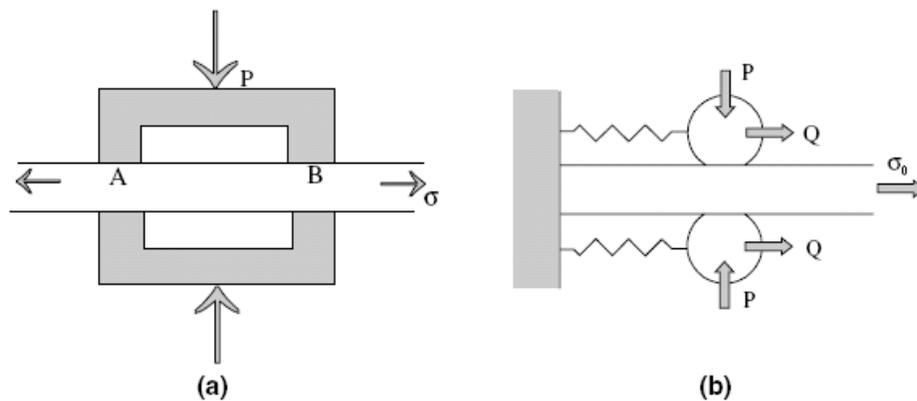


Figure 1.34 : Schéma de l'essai de fretting fatigue:

(a) contre-corps plan

(b) contre-corps cylindrique [25]

La figure 1.34 montre deux dispositifs typiques pour l'essai de fretting fatigue. Le

contre-corps plan (a) est très souvent utilisé [1] car sa mise en œuvre est aisée avec une éprouvette standard de fatigue classique. Mais il y a quelques inconvénients: la condition de contact parfait est difficile à réaliser à cause des difficultés d'alignement. De plus en plus, les chercheurs adoptent un autre dispositif comme le montre la figure 1.34 (b) : contre corps cylindrique [26]. Avec ce dispositif le problème de l'alignement est moins critique et les paramètres importants (effort normal, effort tangentiel) peuvent être mesurés directement.

Remarquons que la plupart des essais de fretting fatigue sont réalisés avec un contrôle de charge cyclique et l'amplitude de déplacement dépend de l'amplitude de la charge. Ce type de contrôle ne permet pas de séparer les paramètres d'essai (l'amplitude de déplacement, l'effort tangentiel, l'effort normal). Pour étudier l'effet de l'amplitude du déplacement sur le comportement de fretting fatigue, Hyukjae Lee et al. effectuent les essais en contrôle de déplacement où l'amplitude du déplacement relatif peut être appliqué sans affecter les autres paramètres en adaptant les deux sollicitations (une sollicitation volumique introduite par la contrainte cyclique et une autre, tangentielle, appliquée pour contrôler la valeur de l'effort de frottement entre l'échantillon et les contre-corps. [18]. Ce dispositif est utilisable à la fois pour les essais de fretting fatigue et de fretting usure.

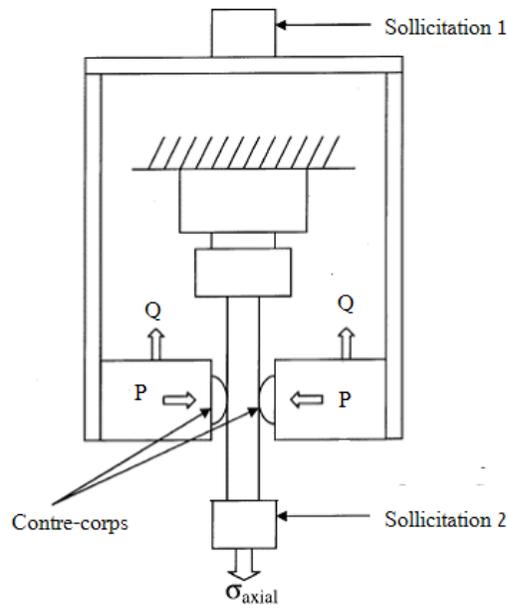


Figure 1.35 Schéma de l'essai de fretting fatigue en contrôle de déplacement

Les autres dispositifs d'essais sont plus proches des géométries réelles. Ils ne seront pas présentés dans cette partie.

1.5.2 Amorçage de fissure en fretting fatigue

- **Un phénomène de multi-fissuration**

Comme dans les essais de fretting usure avec ou sans contrainte, une multi-fissuration sur le domaine de glissement (en bordure de contact) est souvent observée (figure 1.36), même quand la valeur de contrainte cyclique est moins inférieure que la limite de fatigue. Pour les essais en configuration de contact comme indiquée sur la figure 1.34, l'amorçage de fretting fatigue dépend plutôt du fretting que de la sollicitation cyclique, mais celle-ci peut dans certains cas accélérer le processus.

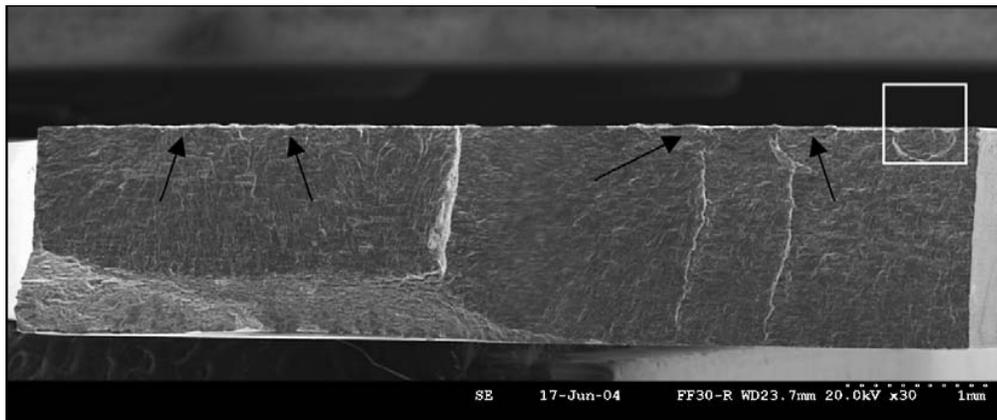


Figure 1.36 Une multi-fissuration style de l'essai de fretting fatigue. [27]

Deux types de fissures

Dans le domaine du frottement (fretting - fatigue, fretting usure avec ou sans contrainte), deux types de fissures peuvent être observés (figure 1.37) [28].

-Fissures de type 1: les fissures qui se propagent suivant une direction comprise entre 15 et 35° par rapport à la surface contact,

-Fissure de type 2: les fissures se propagent suivant une direction comprise entre 65 et 85° par rapport à la surface contact.

Notons que pour les deux types de fissures la direction de la propagation, après le premier stade, s'oriente perpendiculairement à la direction de la charge cyclique

propagation.

D'après Dubourg et Lamacq [28] [Lamacq, 1997] et [Dubourg, 2000] [29], la propagation des fissures de type 1 est dominée par l'amplitude maximale de cisaillement, et celui de type 2 est dominé sous l'effet d'une amplitude maximale de traction.

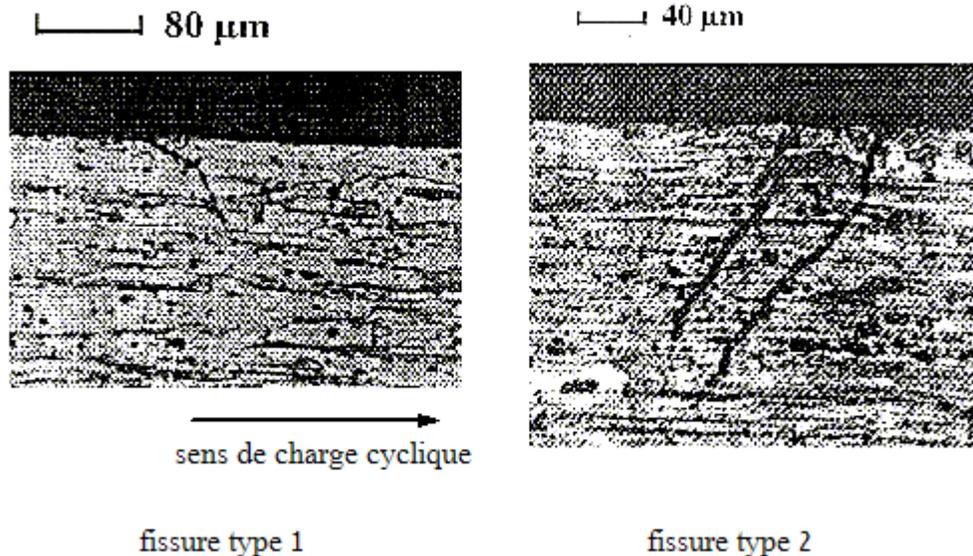


Figure 1.37 les deux types de fissuration de fretting - fatigue.

- **Modèles théoriques**

Afin de trouver une solution pour prédire l'amorçage des fissures, les premières approches utilisent le plus souvent des paramètres du fretting - usure. Le modèle énergétique proposé par Ruiz [30] utilise un paramètre d'endommagement étant le produit $\sigma \tau \delta$, du déplacement local multiplié par le cisaillement maximal et la composante maximale de la contrainte parallèle avec la surface du contact. Ce paramètre est capable pour prédire la localisation de l'amorçage mais la valeur seuil ne semble une constante du matériau.

Les études suivantes adoptent les critères multi-axiaux de fatigue. On considère un plan critique où les critères multiaxiaux sont appliqués pour estimer l'endommagement par fretting-fatigue. Cette approche se heurte à une grande difficulté dans la prise en compte du gradient de contraintes très important en bordure de contact, (figure 1.38 et figure 1.39) [31].

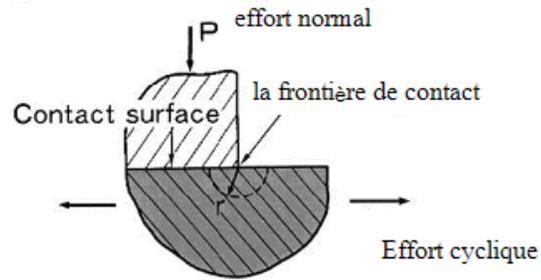


Figure 1.38 Schéma du contact pour le modèle numérique.

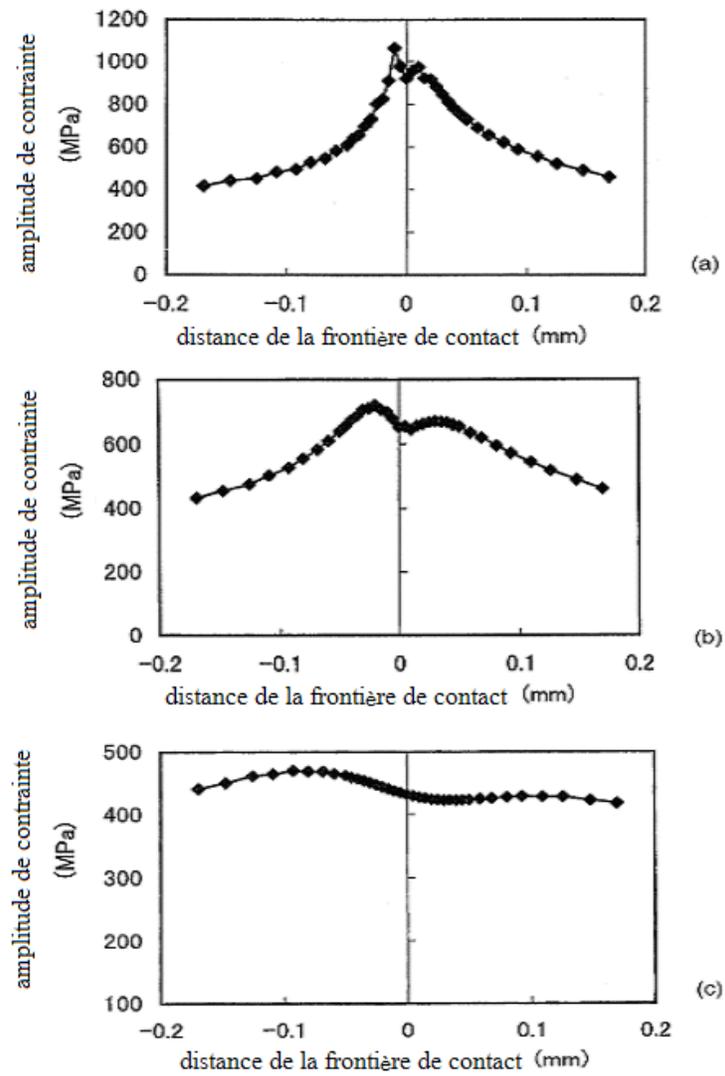


Figure 1.39 Distribution des contraintes au voisinage de la surface du contact. :

(a) 0.001 mm, (b) 0.025mm, (c) 0.1mm au profond.

- Analogie entre les contraintes de contact et l'effet d'entaille

Les travaux de D. Nowell ont montré que l'on pouvait contourner les difficultés liées au contact en utilisant l'analogie avec le champ des contraintes au voisinage d'une entaille. Ceci permet une formalisation plus simple des contraintes qui peuvent alors être analysées avec les approches traditionnelles de fatigue (figure 1.40). Ceci nécessite une approximation pour l'estimation des conditions critiques.

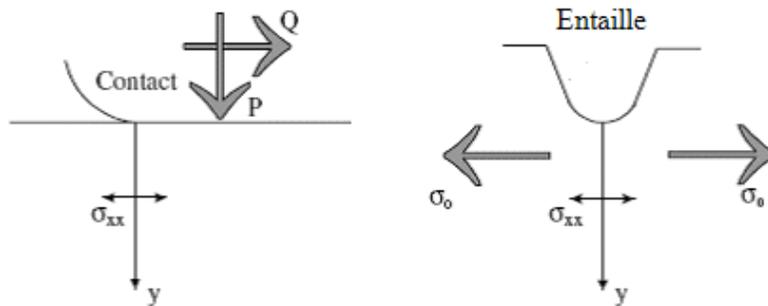


Figure 1.40 Analogie entre le champ des contraintes sur un contact et l'effet d'entaille

[30].

1.5.3 Propagation de fissures sous fretting fatigue

- Deux stades de la propagation de fissures

De nombreux travaux, proposent de décomposer la propagation des fissures courtes en deux stades:

-**Stade I** : Après amorçage, la fissure se développe avec un angle de l'ordre de 45° par rapport à la surface, direction qui correspond au plan du cisaillement maximal. La longueur de cette première fissuration dépend des sollicitations mais surtout du matériau et de sa sensibilité au cisaillement. Un acier ductile sensible au cisaillement maintiendra plus longtemps cette orientation qu'un acier fragile sensible à la contrainte principale.

Durant ce stade, la vitesse de fissuration est plus rapide que celle observée pour un essai de fatigue classique mais décroît rapidement avec l'extension de la fissure en sous-couche. Sato (1986 COM) explique cette décroissance de l'influence du contact par un mécanisme de fermeture de fissure qui s'oppose à la propagation. Dans figure 1.39, nous notons que le gradient de la sollicitation décroît très rapidement en sous-couche. Ainsi

même si la fissure croît, la cinétique de propagation décroît car la sollicitation au niveau de la pointe de la fissure est fortement diminuée.

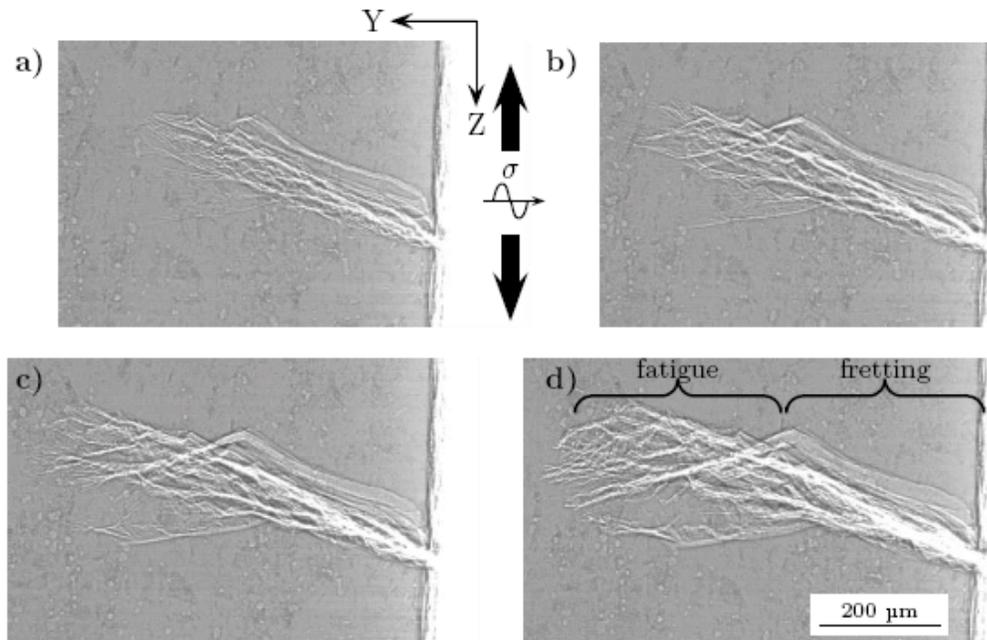


Figure 1.41. Radiographies aux rayons X de zone fissurée (de fretting) au cours du cyclage de fatigue ($\sigma=100$ Mpa et $R=0,15$); a) $N=5000$ cycles, b) $N=20000$ cycles, c) $N=30000$ cycles, d) $N=35000$ cycles. [3]

-Stade II: La croissance de la fissure est contrôlée par la contrainte normale de traction en pointe de fissure. La fissure initialement à 45° s'oriente de façon à présenter un facteur d'intensité K_I maximal soit une orientation perpendiculaire à la contrainte principale maximale. La cinétique de propagation da/dN a été étudiée par Sato (1986). L'auteur explique qu'en pivotant la cinétique de propagation passe par un minimum. Le front de fissure, sorti du domaine d'influence du contact, ne voit plus que la sollicitation de traction résultant de la contrainte normale maximale. La cinétique de propagation augmente de nouveau avec l'extension de la fissure selon la loi de Paris.

- **Modélisation de la propagation de fissure courte**

Dans la dernière décennie, plusieurs de méthodes ont été introduites pour étudier la

propagation de fissures courtes en fretting fatigue: on peut citer :

La méthode utilisant l'analogie contact – entaille [32, 33, 34],

La méthode asymptotique [35],

Le but de ces méthodes est de simplifier l'expression de la distribution des contraintes de contact afin de pouvoir utiliser les méthodes classiques en fatigue multiaxiale.

- **Arrêt des la propagation de fissures courtes**

Dans les essais de fretting fatigue, on note que pour l'amorçage et la propagation de la fissure un champ de contrainte important est nécessaire et que celui-ci doit maintenir lorsqu'on s'éloigne de la surface. Une méthode basée le diagramme de Kitagawa-takahashi a été introduite pour caractériser ce phénomène. [36] [37]

Cette méthode suppose qu'il existe une valeur seuil du facteur d'intensité de contrainte (de front de fissure) ΔK_0 . Si $\Delta K > \Delta K_0$, la fissure courte se propage alors comme une fissure longue, si $\Delta K < \Delta K_0$ la fissure courte ne se propage pas. Si l'amplitude de la contrainte appliquée $\Delta \sigma > \Delta \sigma_{f1}$ (limite de fatigue), les fissures courtes s'amorcent et se propagent, si $\Delta \sigma < \Delta \sigma_{f1}$, les fissures courtes ne s'amorcent pas (figure 1.42).

En effet

$$\Delta K_0 = Y \Delta \sigma_{f1} \sqrt{\pi \alpha} \quad (1.3)$$

Où

Y facteur géométrique,

α longueur de fissure,

σ_{f1} limite de fatigue

On peut déduire la valeur seuil de la longueur de fissure de passage d'une fissure courte à une fissure longue :

$$\alpha_0 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_0}{Y \Delta \sigma_{f1}} \right)^2 \quad (1.4)$$

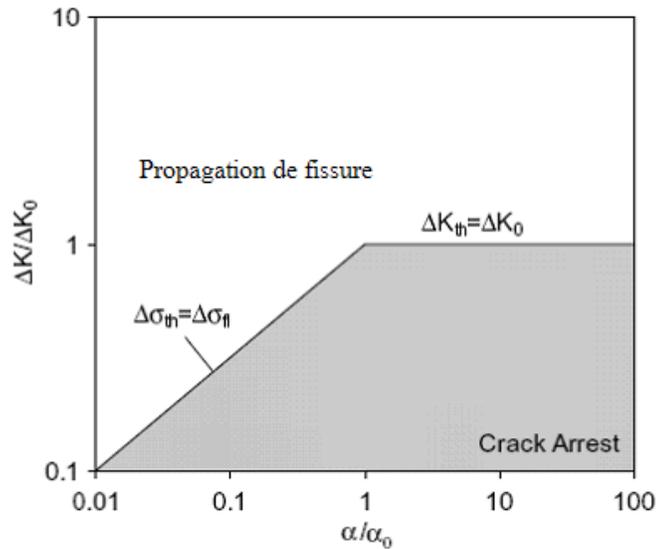


Figure 1.42 Diagramme de Kitagawa-Takahashi (α : longueur de fissure).

La limite d'endurance déterminée en fretting - fatigue ne correspond pas à la condition d'amorçage mais plutôt à la condition limite permettant la propagation des fissures courtes (induites par le contact). La propagation de fissure longue est similaire à celle de la fatigue pure.

1.5.4 Influence et interaction de paramètres de la sollicitation

- **Effet de la contrainte cyclique sur le coefficient de frottement**

La figure 1.43 montre que dans le début de l'essai de fretting - fatigue, le coefficient de frottement augmente avec le nombre de cycles; mais après environ mille cycles, il arrive à une valeur maximale et il se stabilise jusqu'à la fin du test. La plus grande contrainte cyclique correspond dans l'étape stabilisée, pour la même valeur de l'effort normal, au plus grand de coefficient de frottement.

- **Effet de la pression de contact sur la durée de vie en fretting - fatigue**

La pression de contact, montre un comportement variable sur la durée de vie en fretting - fatigue pour l'alliage d'aluminium 6061 (figure 1.44): elle commence par décroître, passe par une valeur minimale avec une pression de contact de 100 MPa, puis croît pour passer par une valeur maximale à 150 MPa puis décroît.

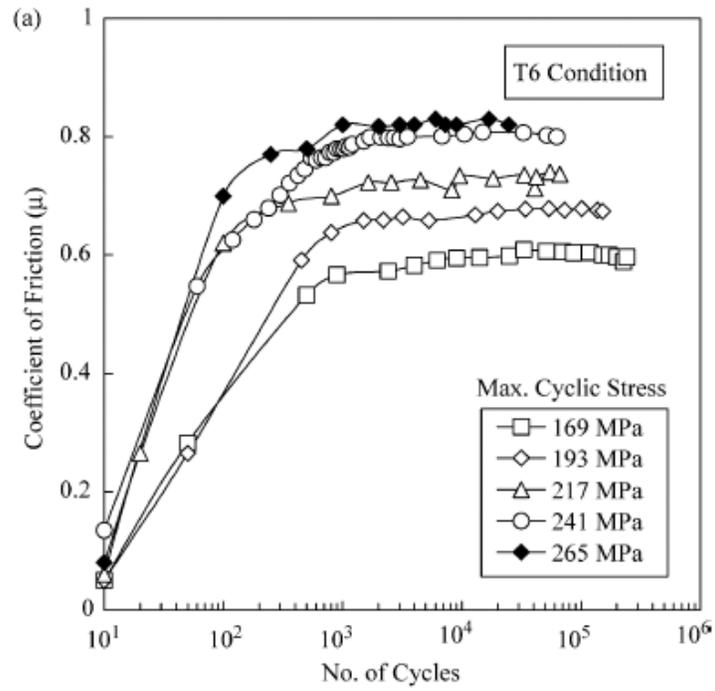


Figure 1.43. Evolution de coefficient de frottement avec nombre de cycles (AA6061 -T6)

[1]

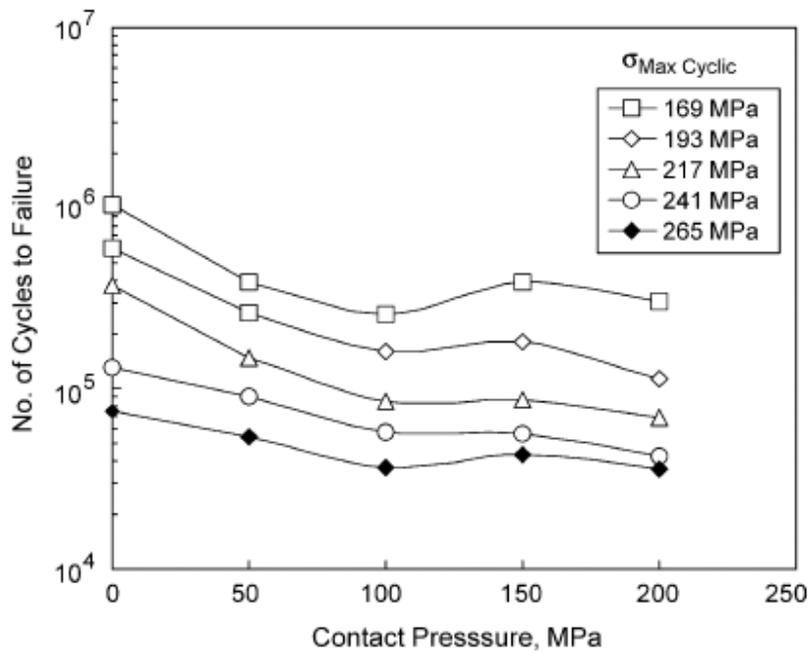


Figure 1.44 Effet de la pression contact sur la durée de vie de fretting fatigue [38]

- **Effet de l'amplitude relative du glissement sur la durée de vie en fretting fatigue**

Comme le montre la fig.1.45, l'augmentation de l'amplitude relative du glissement, décroît la durée de vie en fretting fatigue dans une première phase puis passe par un minima pour croître de nouveau.

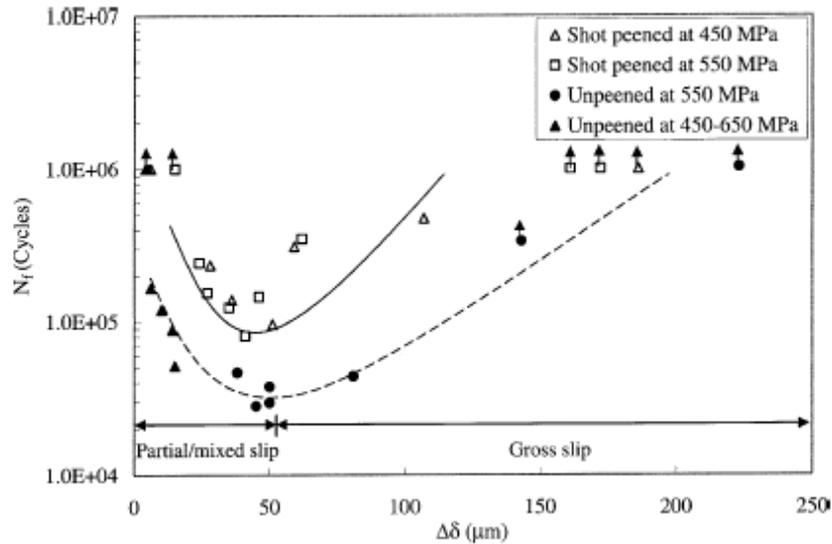


Figure 1.45 Effet de l'amplitude relative du glissement sur la durée de vie [18]

- **Effet de l'amplitude relative du glissement sur l'effort tangentiel**

La Figure 1.46 montre que, avec la même valeur de l'effort normal, dans le domaine de frottement partiel ou mixte ($\Delta\delta < 50 \mu\text{m}$), l'effort tangentiel augmente de 500 N à environs 2500 N lorsque l'amplitude du glissement passe de quelques microns à 50 microns. Par contre dans le domaine de glissement total ($\Delta\delta > 50 \mu\text{m}$), l'effort tangentiel reste sensiblement constant avec une valeur d'environ 2500 N pour une amplitude du glissement allant de 50 μm à 250 μm .

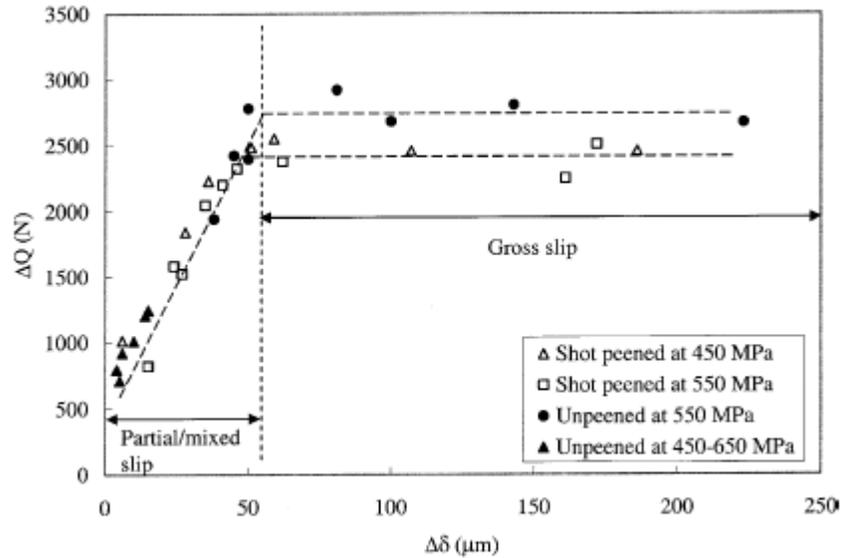


Figure 1.46 Effet de l'amplitude relative du glissement sur l'effort tangentiel

1.6 Étude du fretting fatigue pour les assemblages par rivetage ou boulonnage

Dans la bibliographie, la plupart des travaux ont été réalisés pour étudier la condition d'assemblage représentée par la fig. 1.47. Le chargement cyclique est appliqué sur les différentes plaques. Cette condition représente la plupart des assemblages réels obtenus par rivetage ou boulonnage. Généralement la condition de contact reste très compliquée à modéliser et la détermination des paramètres en fretting fatigue reste délicate.

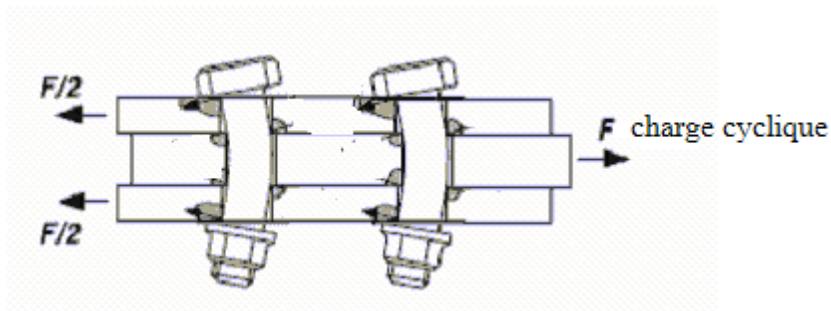


Figure 1.47 Schéma d'un assemblage avec chargements cycliques sur les deux plaques

La Figure.1.48 montre une autre condition d'assemblage pour laquelle le chargement

cyclique est appliqué sur une seule plaque. Dans cette configuration, le chargement cyclique et le contact entre l'écrou et la plaque introduit le fretting fatigue sur le matériau de la plaque autour du trou. Il n'existe aucune donnée bibliographique sur cette configuration.

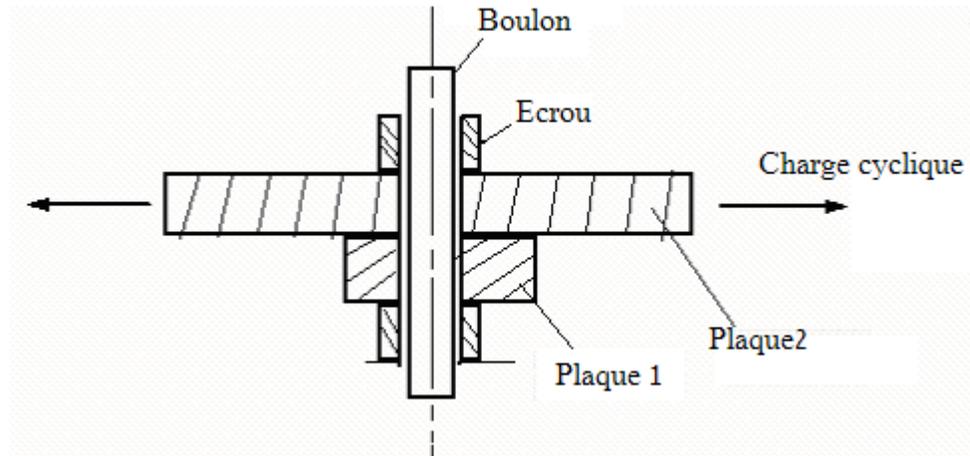


Figure 1.48 Schéma d'un assemblage avec chargement cyclique sur une seule plaque

1.7 Conclusion, description de la problématique.

Le tableau 1.2 montre une synthèse sur les études de fretting, de fatigue et de fretting-fatigue. Il apparaît que:

- 1) Pour la phase d'amorçage, le comportement en fretting - fatigue est proche de celui en fretting usure;
- 2) Pour la phase de propagation de fissures longues, le comportement en fretting-fatigue est proche de celui en fatigue pure;
- 3) Pour la phase de propagation de fissures courtes, on observe généralement une superposition de fretting et de fatigue. Cette étape correspond à la plus grande partie de durée de vie en fretting fatigue.

Pour ces approches, il faut noter que:

- 1) Les essais ont été conduits pour différentes conditions de contact. Pour les essais de fretting, la plupart des essais ont été développés pour des contacts cylindre/plan, mais et ceux de fretting fatigue, pour des contacts plan/plan.

Les différentes conditions peuvent cependant conduire à des conclusions différentes.

2) Les essais de fretting sont effectués à faible fréquence (1 ou 5 Hz, par exemple), les essais de fatigue et de fatigue fretting sont réalisés avec des fréquences plus élevées (20 ou 30 Hz, par exemple). Il faut noter que dans chaque cas, les essais sont sensibles à la fréquence ce qui complique une interprétation globale.

Ce travail est consacré à l'étude du fretting-fatigue pour les assemblages, rivetés ou boulonnés. La figure 1.48 illustre la géométrie retenue pour cette étude.

Les études bibliographiques montrent que l'on peut employer trois méthodes dans cette approche.

1) Observation micrographique et analyse de matériau, surtout sur les zones de frottement (au bord de contact). Ceci permet l'analyse de la microstructure locale et de la première phase de la fissuration et de l'endommagement.

2) Une méthode de suivi de l'évolutions des paramètres (effort normal, déformation de l'éprouvette, ...) durant l'essai.

3) Analyse numérique par Eléments Finis afin de déterminer les champs de contraintes pour les différentes conditions de contact.

		Fretting usure (FU)	Fretting fatigue (FF)	Fatigue (F)
Amorçage de microfissure	mode	Multi-fissuration	Pareil à (FU)	Multi-fissuration ou fissuration unique
	Site	dans la zone externe du contact (zone du frottement)	Pareil à (FU)	intrusion-extrusion; inclusion, entaille
	Angle (direction)	entre 15 et 35° ou entre 65° et 85° par rapport à la surface contact	Pareil à (FU)	45° par rapport à la surface ou dépend de l'inclusion ou de l'entaille
	Méthode de prédiction	Carte de Réponse du Matériau	Seuil de fretting fatigue ou Carte de Réponse du Matériau	Seuil de fatigue

	Durée de vie	Au début de essai (peut-être <10cycles)	Idem à (FU)	Partie prépondérante de la durée de vie en fatigue
Propagation de fissures courtes	Vitesse		Plus rapide que (F) mais diminue très vite avec la croissance de la fissure	Très faible mais augmente très vite avec la croissance de la fissure
	direction	45° par rapport à la surface du contact	45° par rapport à la surface du contact	45° par rapport à la surface
	Arrête de propagation		Oui	Non
	Durée de vie		Partie la plus importante de la durée de vie en fretting fatigue	Une partie importante de la durée de vie de fatigue (40-99% ensemble avec amorçage)
Propagation de fissures longues	formalisation		Idem à (F)	Loi de Paris
	direction		Idem à (F)	perpendiculaire à la contrainte principale maximale
	Conduit à rupture	non	oui	oui

Tableau 1.2 Synthèse des études de fretting, fretting fatigue et fatigue

II: ÉTUDE EXPERIMENTALE

2.1 Introduction

Le fretting fatigue est une combinaison de fretting et de fatigue, cette combinaison doit tenir compte de trois facteurs essentiels: la charge cyclique (qui induit principalement le déplacement relatif), la charge normale et le coefficient de frottement. L'étude expérimentale du fretting fatigue consiste à étudier les effets de ces trois facteurs sur les comportements du matériau ou de la structure. Pour y parvenir, on doit réaliser une étude complète en fatigue dans un premier temps. Ensuite l'aspect fretting est couplé à la fatigue et les autres facteurs cités précédemment sont considérés.

Dans ce travail l'étude expérimentale est réalisée par les essais donnés ci-dessous:

- 1. Essais de fatigue avec les éprouvettes avec un trou central.**
- 2. Essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux sur des éprouvettes avec un trou central.**
- 3. Essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux sur des éprouvettes avec un trou central suivi d'une expansion à 4.5%.**
- 4. Essais de fretting fatigue pour différents coefficients de frottement avec un trou central.**
- 5. Essais de fretting fatigue sur des assemblages boulonnés (Alu-Acier) avec un trou expansé et sans expansion**

2.2 Matériaux étudiés

Le matériau utilisé principalement dans ce travail est un alliage d'aluminium 5086H24. Le matériau a été fourni, sous forme de tôles laminées d'une épaisseur de 6 mm.

2.2.1 Composition chimique

La composition chimique en pourcentage de cet alliage étudié est donnée dans le tableau (2.1)

Nuance	Cr	Mg	Si	Mn	Ti	Cu	Zn	Fe	Other
5086H24	0,05-	3,5-	Max	0,2-	Max	Max	Max	Max	Max
	0,25	4,5	0,4	0,7	0,15	0,1	0,25	0,5	0,15

Tableau. 2.1 Composition chimique de l'alliage utilisé (% massique)

2.2.2 Essai de traction

Pour déterminer les caractéristiques mécaniques de l'alliage étudié, l'essai de traction est réalisé sur une machine de traction servo-hydraulique INSTRON 8516 de capacité $\pm 100\text{kN}$. L'éprouvette utilisée est plate d'épaisseur 6 mm. La figure 3.1 montre la géométrie et les dimensions de l'éprouvette utilisée.

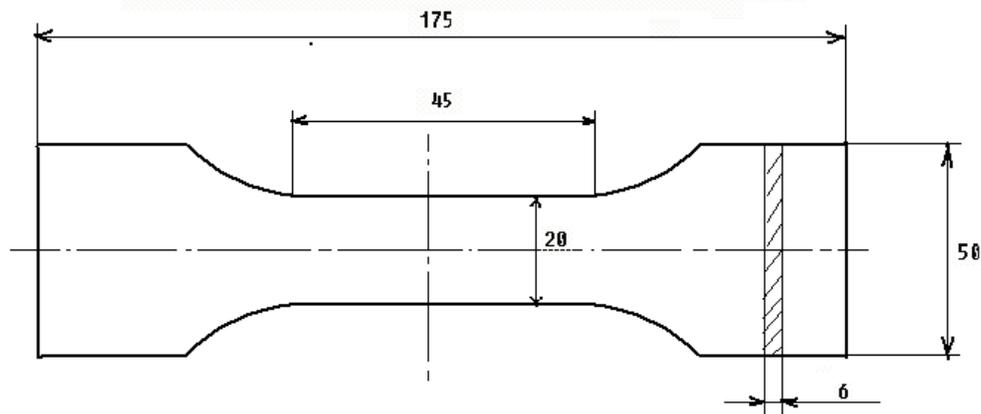


Figure 2.1 Géométrie et dimensions de l'éprouvette utilisée pour l'essai de traction.

Dans l'essai de traction, la machine est contrôlée sur un mode de position et la vitesse de traction est 0.03 mm/s. Les déformations ont été mesurées à l'aide d'un capteur à lames placé sur la région centrale de l'éprouvette. La courbe <<charge-allongement>> a été enregistrée. La courbe de contrainte - déformation est donnée par la figure 2.2. Cet essai a permis de déterminer les principales caractéristiques mécaniques regroupées dans le tableau (2.2).

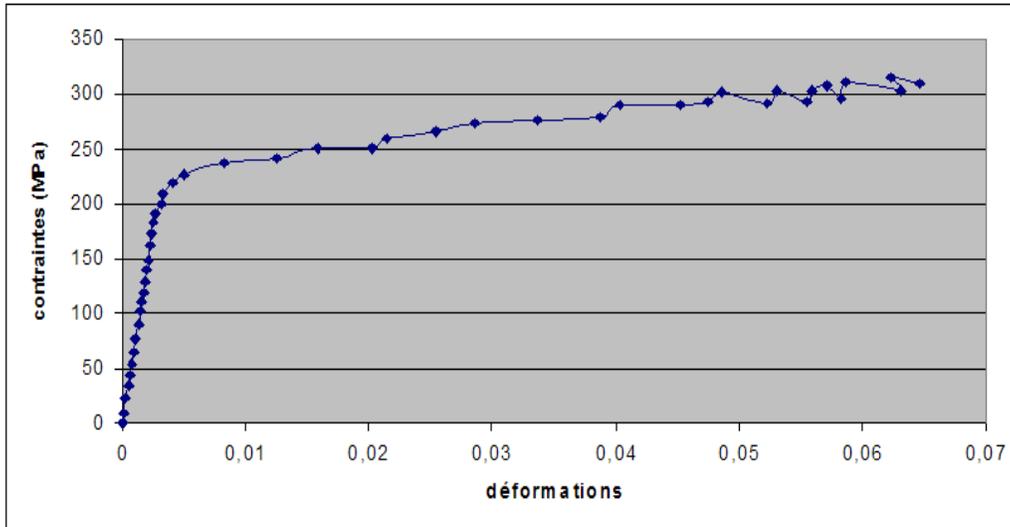


Figure 2.2 Courbe rationnelle d'essai de traction pour l'alliage d'aluminium 5086H24

Résistance à la traction (R_m)	315 MPa
Limite conventionnelle d'élasticité ($R_{0,2\%}$)	196 MPa
L'allongement pour cent (A%)	12%
Module d'élasticité (E)	71 GPa
Coefficient de Poisson (ν)	0.33

Tableau. 2.2 Caractéristiques mécaniques d'alliage d'aluminium 5086H24

2.3 Essai de fatigue avec les éprouvettes avec un trou central.

Le but de ces essais est pour obtenir la courbe S-N du matériau et pour étudier le comportement de fissuration avec l'éprouvette avec un trou central.

2.3.1 Éprouvettes utilisées

Les éprouvettes qui ont été utilisées pour l'essai de fatigue ont un trou central comme l'indique la figure 2.3.

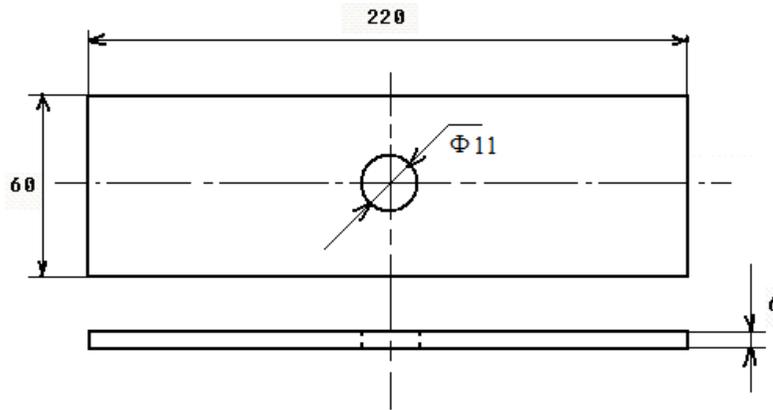
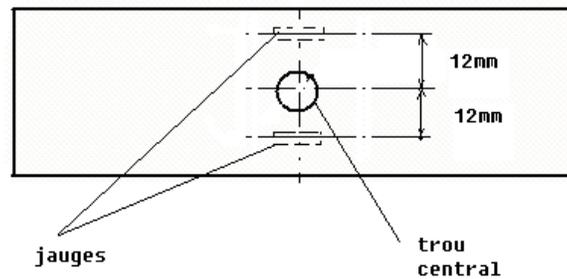


Figure 2.3 Géométrie des éprouvettes de fatigue (dimension en mm)

Le prélèvement des éprouvettes s'est effectué dans le sens du filage, la charge cyclique est ainsi appliquée dans le même sens. Après le perçage du trou, les éprouvettes sont polies dans la zone centrale au papier carbure de silicium grain 80, 200 et puis 500 avec lubrification à l'eau pour obtenir un bon état de surface. Celui-ci facilite l'observation de fissure pour les essais de fatigue et est aussi nécessaire pour la procédure de collage des jauges.



a)



b)

Figure 2.4 Eprouvette avec deux jauges ; a) schématique; b) la photo

2.3.2 Conditions expérimentales de chargement

Les essais de fatigue sont réalisés avec une machine de traction hydraulique INSTRON 8516 avec une sollicitation périodique de forme sinusoïdale. Les conditions de chargement sont données sur le tableau (2.3). Le rapport de la charge minimale par la charge maximale $R=0,1$ et la fréquence est entre 12 et 25 Hz. Tous les essais sont réalisés sous une température ambiante.

Echantillons	CF_1	CF_2	C_9	CF_3
Charge moyenne (kN)	34,32	25,00	22,01	15,62
Amplitude de la charge (kN)	28,08	20,45	18,01	12,78

Tableau 2.3 Conditions de chargement pour les essais de fatigue

2.3.3 Les méthodes de suivie de la fissure

Pour suivre la fissure, on utilise deux méthodes :

- méthode optique
- méthode électronique (utilisant des jauges).

La méthode optique utilise une vidéo camera CCD SONY, et TV ZOOM LENS 18-108mm (F25) pour faire les photos de fissure en cours d'essai. Les photos sont collectées et enregistrées par un ordinateur. Avec l'aide de ces photos, la longueur de fissure et le nombre de cycles de fatigue sont donnés.

La méthode électronique est réalisée avec l'aide des jauges, elle sera développée sur les paragraphes suivants.

2.4 Essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux sur des éprouvettes avec un trou central.

Le but de ces essais est d'étudier l'effet des efforts normaux sur le comportement de fretting fatigue.

Les éprouvettes utilisées dans ces essais sont de même type que celle utilisés pour les essais de fatigue avec les éprouvettes avec un trou central.

2.4.1 Conditions expérimentales de chargement

Les conditions de chargement sont données sur le tableau (2.4). Le rapport de charge est le même $R=0,1$ et la fréquence est de 25 Hz.

Eprouvette	Charge moyenne (kN)	Amplitude de la charge (kN)	Charge normale nominale (kN)
C_7	22.01	18.01	4
C_6	22.01	18.01	6
C_1	22.01	18.01	8
C_16	22.01	18.01	10
C_8	22.01	18.01	12
C_2	20.59	16.85	8

Tableau 2.4 Conditions de chargement pour les essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux

2.4.2 Prise en compte du contact

Du point de vue expérimental, nous avons réalisé une pièce sur laquelle nous avons collé des jauges dans plusieurs directions comme le montre les figures. 2.6 et 2.7. Les jauges (J3 et J4) collées sur la surface cylindrique de la pièce permettent de contrôler l'effort normal de serrage ainsi que son évolution au cours des essais de fatigue. Les jauges (J5 et J6) collées sur la surface plane permettent de donner des indications indirectes sur l'amorçage et la propagation de la fissure à gauche ou à droite du trou ainsi que sur le déplacement relatif de contact qui est introduit par le chargement cyclique.

La pièce et la rondelle sont mises en contact avec l'éprouvette par un boulon comme le montre la figure 2.8. Au début d'essai, on applique en premier l'effort moyen de la charge cyclique sur l'éprouvette. Ensuite, on applique l'effort normal sur l'éprouvette par serrage du boulon et l'essai de fretting fatigue est lancé.

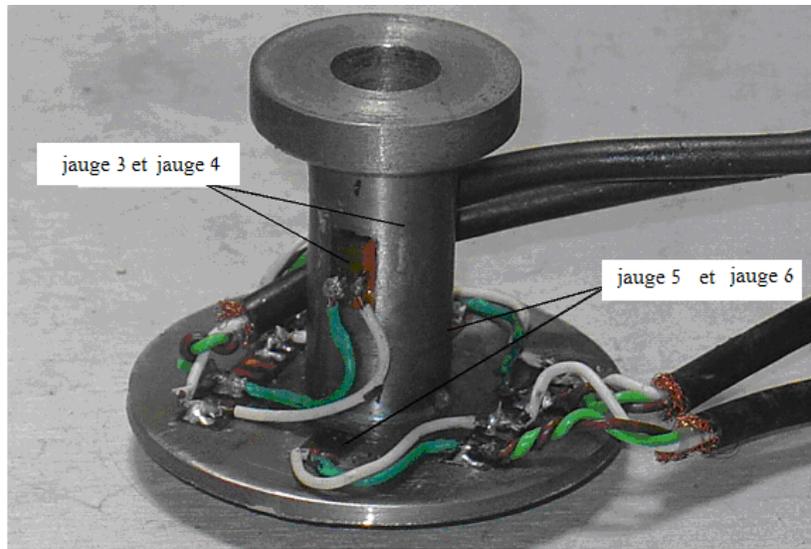


Figure 2.6 Photo de la pièce (contre-corps) et jauges

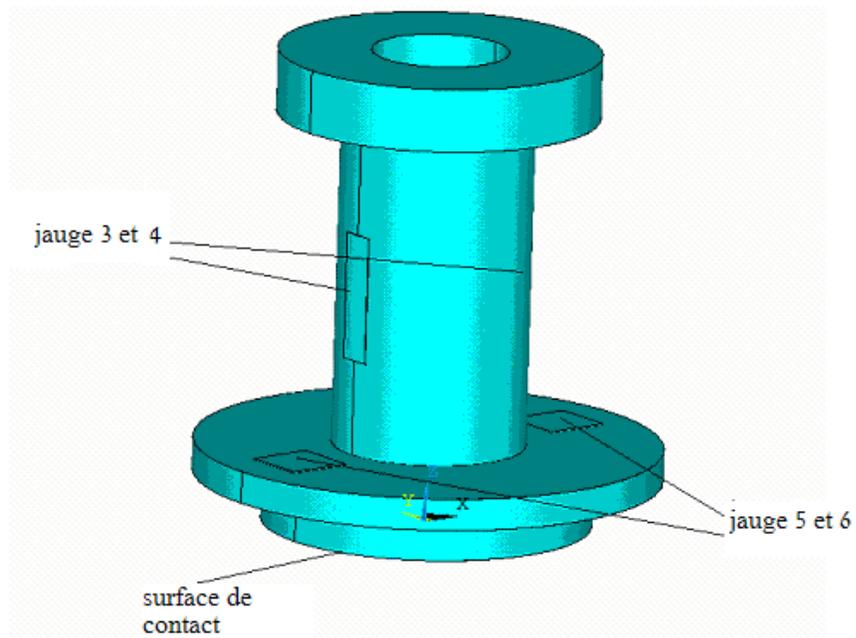


Figure 2.7 Schéma de la pièce et position des jauges.

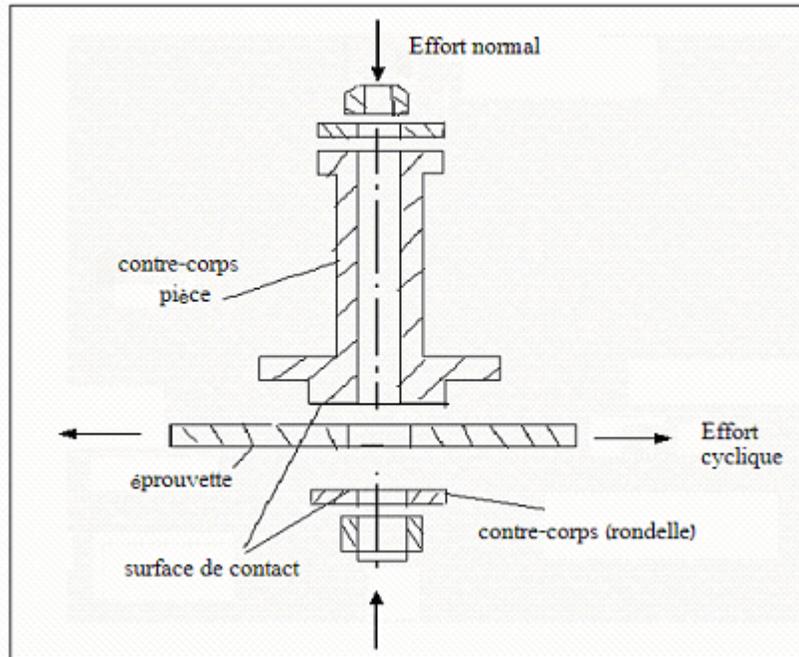


Figure 2.8 Mise en contact avec contre-corps (une pièce et une rondelle).

2.4.3 Dispositif et équipement électronique

Le dispositif électronique est employé pour deux buts essentiels. D'abord, on l'utilise pour mesurer l'effort normal de contact en temps réel. Par ailleurs on l'utilise pour suivre la détection et la propagation de la fissure.

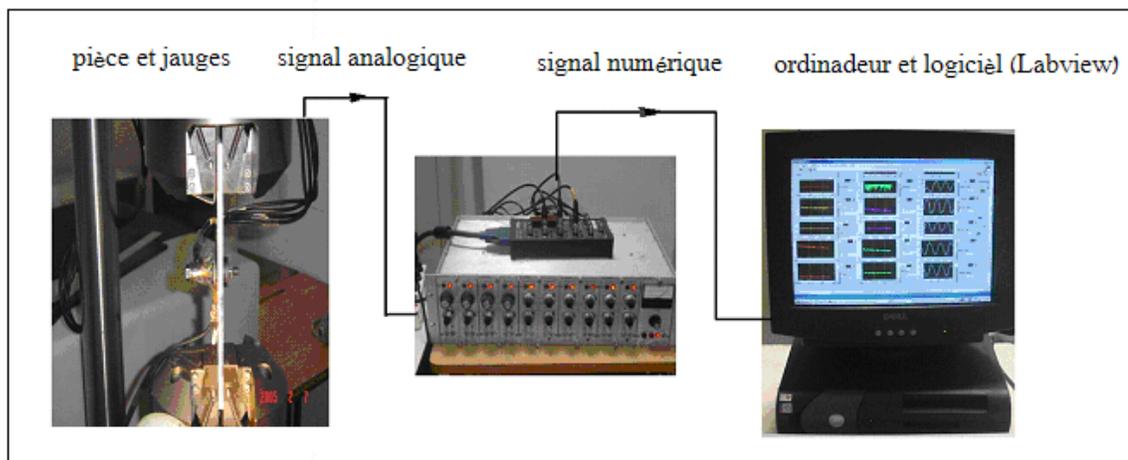


Figure 2.9. Montage de l'éprouvette et système de suivi électronique

2.4.3.1 Principe de mesure

La figure 2.9, présente le dispositif de suivi électronique. Les différents éléments du dispositif sont les suivants:

- Jauge type: CEA-06-062UW-120; Résistance : $120.0 \pm 0.3 \Omega$ sur $24^\circ C$; Facteur $= 2.15 \pm 1\%$. On a utilisé 6 jauges :
- Pont et signal amplificateur: on utilise un 1/4 pont, avec BNC-2110, National Instruments Desktop et DIN Rail-Mountable BNC Adaptateur.
- Acquisition de signal électronique: par NI-DAQ TM 7 E séries.
- Traitement de signal: est effectué par logiciel LABVIEW.

Le traitement de signal consiste au choix du signal, à la comparaison de signal, à la visualisation de celui ci et le stockage des points. Dans notre travail, nous avons choisi la valeur maximale (colonne gauche dans figure 2.10) minimale (colonne centrale) du signal pendant l'essai et son suivi en continu (en temps réel) (colonne droite) pour les 6 jauges (chaque rang est pour un jauge).

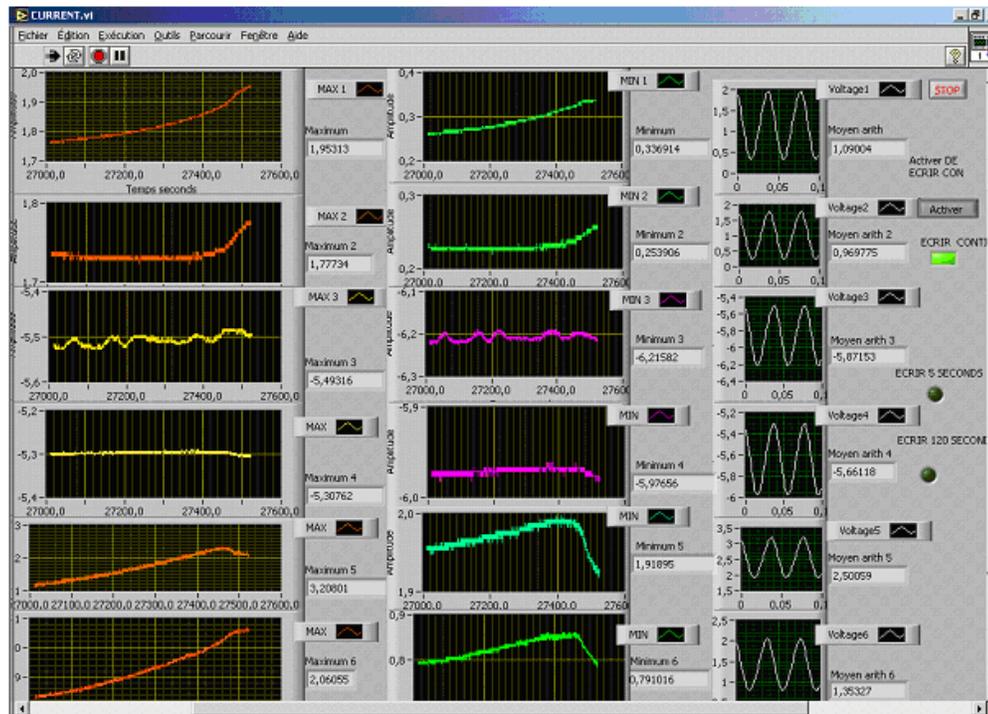


Figure 2.10 Fenêtre Labview pour suivre et enregistrer les signaux de jauges.

2.4.3.2 Etalonnage de la pièce

On utilise la pièce (montrée sur la figure 2.6) comme un contre-corps et en même temps comme un capteur pour mesurer la charge de serrage (effort normal). Dans la pièce, on colle les deux jauges (n°. 3 et 4) sur la surface du cylindre comme indiqué sur la figure 2.8 et 2.9. En théorie, La relation entre la déformation et la charge serrage (effort normal) est linéaire et est donnée par la formulation suivante:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{AE} \quad (2.1)$$

Où ε est la déformation de la pièce sur la surface de cylindre; σ est la contrainte, et A est l'aire de la section de cylindre (56.35mm^2); E est le module d'élasticité de matériau (acier 45) ($2,07\text{E}5$ MPa). F est la charge de serrage (kN)

Pour le pont de Wheastone 1/4, il y a une relation entre la déformation et la tension du signal:

$$\varepsilon = 4e / KU \quad (2.2)$$

Où e est la tension du signal, K est le facteur de jauge (2,075), U est la tension de l'excitation (10 V).

Pour obtenir 0-10 V à la sortie, on utilise un gain de $K_M=1140$, la relation entre le signal final (tension) e_f et la charge de serrage F est :

$$e_f = K_M e = K_M KU \varepsilon / 4 = K_M KUF / 4AE$$

Soit

$$\frac{e_f}{F} = \frac{K_M KU}{4AE} = 0.5 \quad (2.3)$$

L'étalonnage de la pièce avec les jauges est réalisé pour vérifier cette relation (2.3) et aussi pour appliquer différentes valeurs de l'effort normal, le résultat de l'étalonnage est montré sur la figure 2.11. Sur la figure, e_3 et e_4 sont les voltages du signal final pour

les jauges numéro 3 et la jauge numéro 4. La figure montre qu'il existe un faible décalage entre les résultats de la jauge numéro 3 et celui de la jauge numéro 4, ceci est dû au désalignement de la charge sur la surface de la pièce. Mais la relation entre la charge de serrage et la tension moyen $(e_3+e_4)/2$ est linéaire. On peut alors utiliser la tension moyen pour détermine la charge de serrage.

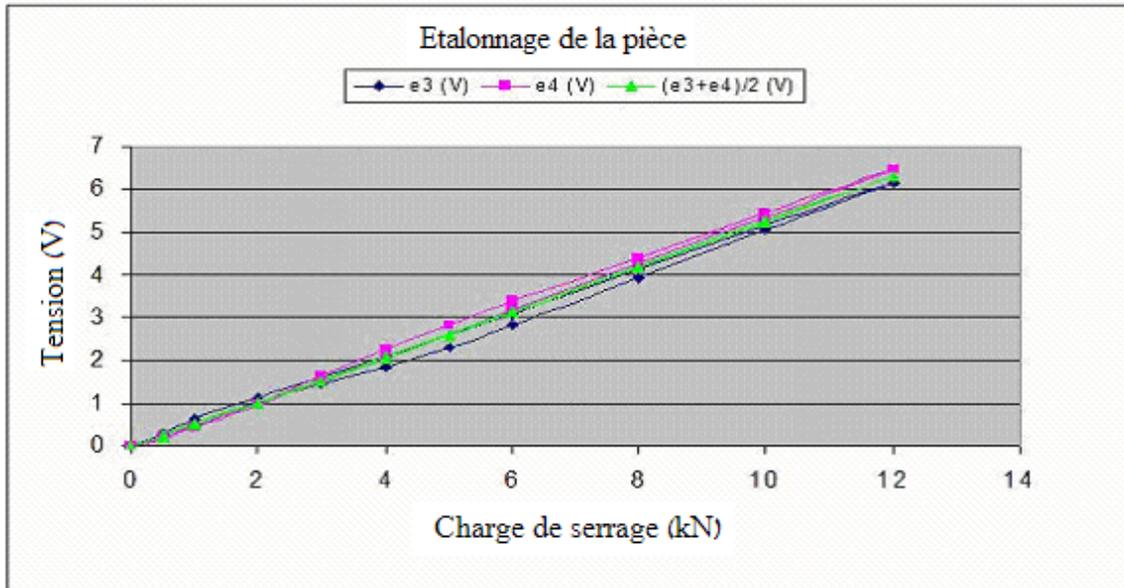


Figure 2.11 Etalonnage de la pièce

2.4.4 Le dispositif d'essai

Le dispositif d'essai est représenté sur la figure 2.12. Trois ensembles sont employés dans l'essai : 1) l'ensemble de suivi de fissure électronique ; 2) l'ensemble de suivi de fissure par camera et ordinateur ; 3) l'ensemble montage de l'éprouvette et controle de essai.

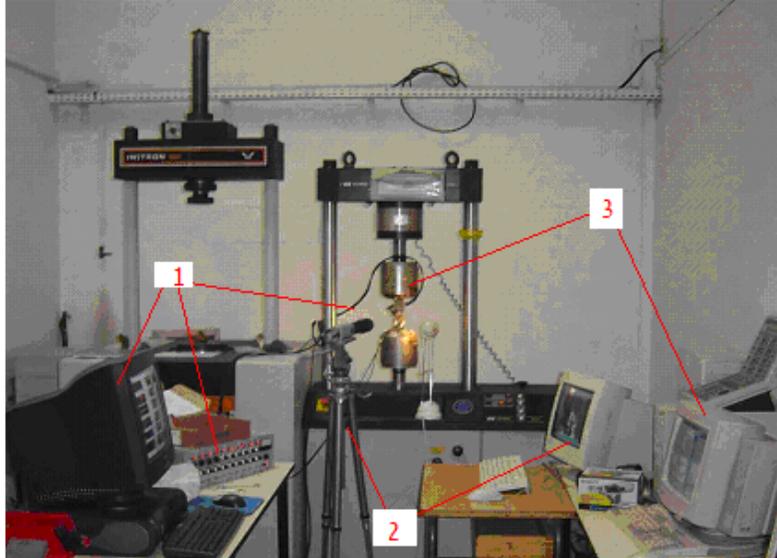


Figure 2.12 Dispositif d'essai.

2.5 Essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux sur des éprouvettes avec un trou central suivi d'une expansion à 4.5%.

Ces essais sont réalisés pour étudier l'effet de l'expansion du trou sur la durée de vie en fretting fatigue.

2.5.1 Éprouvettes utilisées

Les éprouvettes utilisées pour ces essais sont de même type que celle utilisées lors des essais de fatigue, mais avec un trou central de diamètre de 10,5 mm dans un premier temps et ensuite expansé à 11 mm par un passage d'une bille d'acier de $\varnothing 11$ mm, comme le montre la figure 2.13. Le degré d'expansion est calculé avec la relation suivante. Pour notre cas le degré d'expansion est de 4.5%.

$$DE(\%) = \frac{D - d}{d} \times 100\% \quad (2.4)$$

Avec $DE(\%)$ est le degré d'expansion, D est le diamètre après expansion, d est le diamètre avant expansion.

L'expansion est réalisée sur la presse hydraulique avec une vitesse de passage très lente. La figure 2.14 présente la presse hydraulique utilisée pour l'expansion. Après

expansion, un polissage est appliqué sur la face de la sortie et sur la face d'entrée pour éliminer les bourrelets introduits par l'expansion (Figure 2.15).

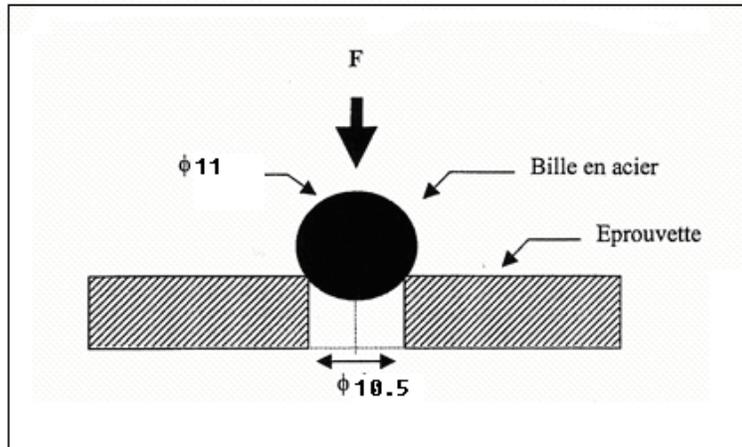


Figure 2.13 Schéma de l'expansion du trou.

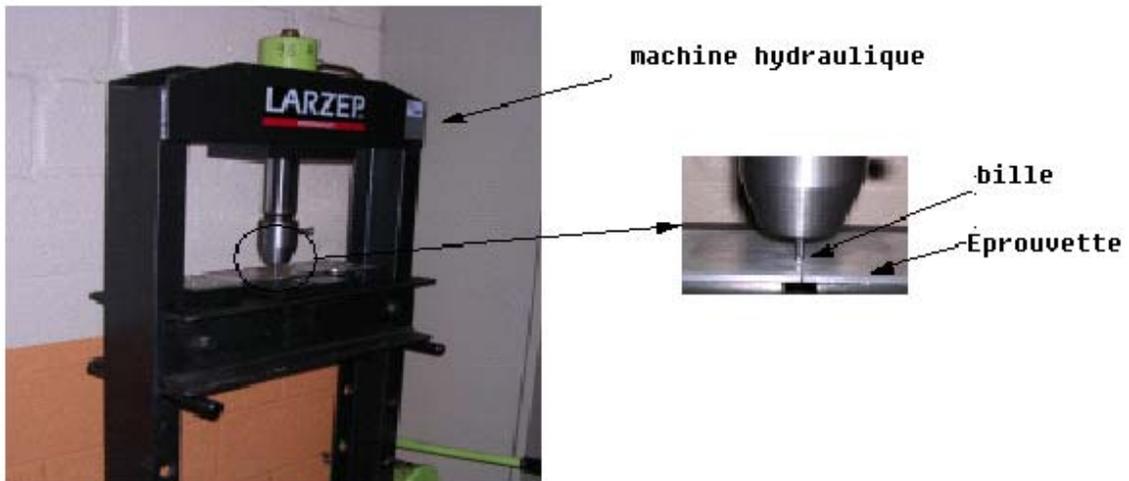


Figure 2.14 Presse hydraulique utilisée pour l'expansion du trou

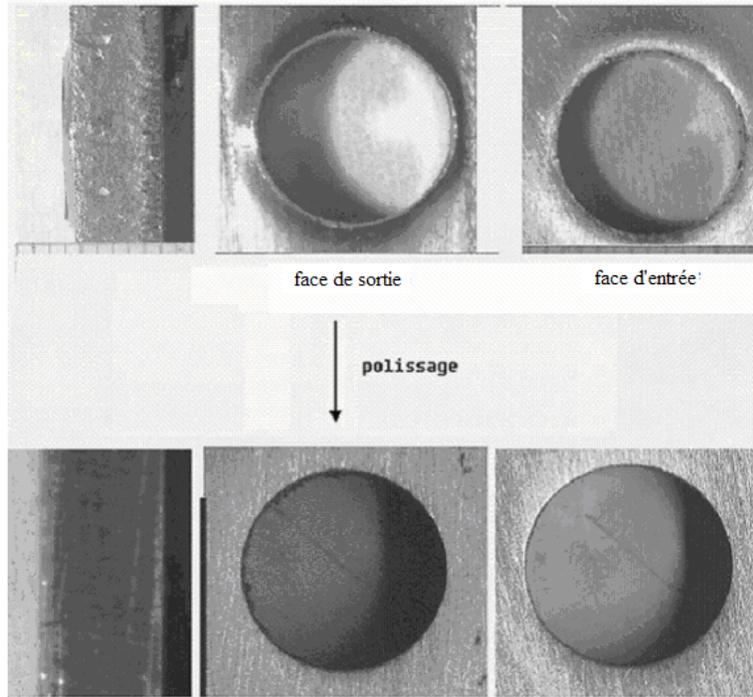


Figure 2.15 Bourrelet après expansion et l'aspect au tour du trou après polissage de l'éprouvette.

2.5.2 Conditions expérimentales

Eprouvette	Charge moyenne (kN)	Amplitude de la charge (kN)	Polissage	Effort normal (kN)
C_15E	22.01	18.01	2 faces	1,5
C_10E	22.01	18.01	2 faces	4
C_4E	22.01	18.01	Face de la sortie	4
C_3E	22.01	18.01	Face de la sortie	8
C_11E	22.01	18.01	2 faces	8
C_14E	22.01	18.01	2 faces	10
C_5E	22.01	18.01	2 faces	12
C_12E	22.01	18.01	2 faces	12

Tableau 2.5 Les conditions de chargement pour les essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux sur des éprouvettes avec un trou central suivi d'une expansion à 4.5%

2.6 Essais de fretting fatigue pour différents coefficients de frottement avec un trou central.

2.6.1 Éprouvettes utilisées

Les éprouvettes qui ont été utilisées pour ces essais sont comme l'indique la figure 2.16.

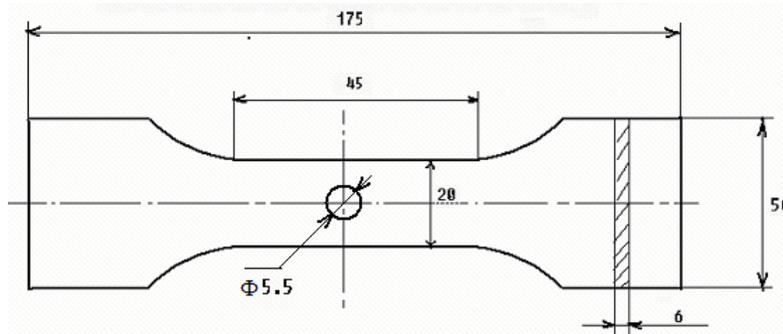


Figure 2.16 Géométrie de l'éprouvette avec trou central pour l'essai de fretting fatigue pour différents coefficients de frottement avec un trou central.

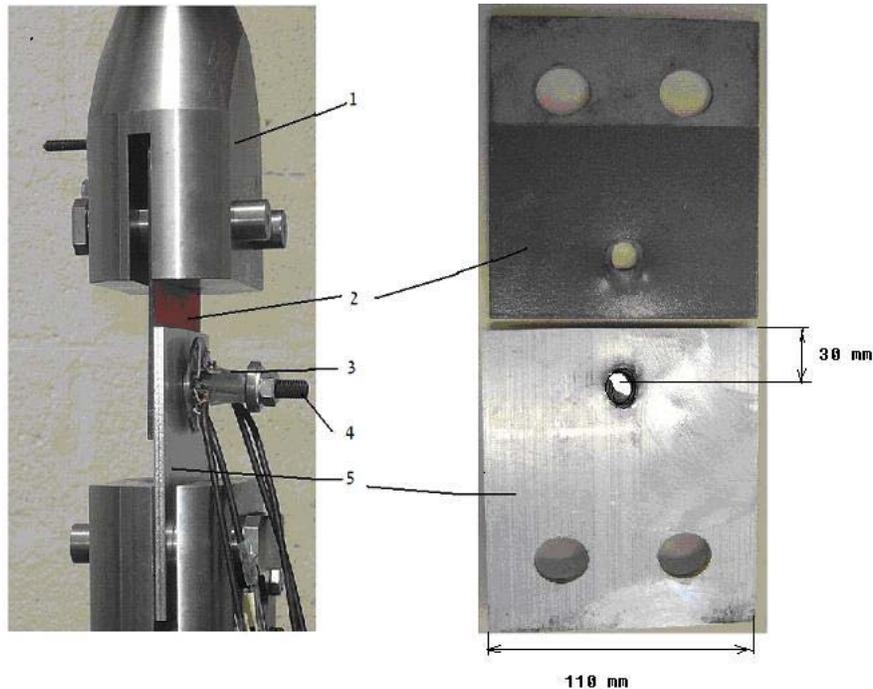
2.6.2 Conditions expérimentales

Eprouvette	Charge moyenne (kN)	Amplitude de la charge (kN)	Coefficients de frottement	Charge normal (kN)
CS_3	6,85	5,6	0,049	6,15
CS_4	6,85	5,6	---	0,00
CS_5	6,85	5,6	0,068	6,15
CS_6	6,85	5,6	0,117	6,15
CS_7	6,85	5,6	0,167	6,18
CS_8	6,85	5,6	0,167	6,16
CS_9	6,85	5,6	0,117	6,18

Tableau 2.6 Conditions de chargement pour les essais de fretting fatigue pour différents coefficients de frottement sur des éprouvettes avec un trou central.

2.7 Essais de fretting fatigue sur des assemblages boulonnés (Alu-Acier) avec un trou expansé et sans expansion

2.7.1 Éprouvettes et dispositif utilisés



- 1). Dispositif expérimental de montage ; 2) partie supérieure de l'assemblage en acier ; 3) pièce munie des jauges; 4) boulon ; 5) partie inférieure de l'assemblage en aluminium.

Figure 2.17 Photos de l'assemblage et de dispositif de l'essai de fretting fatigue sur des assemblages boulonnés (Alu-Acier) avec un trou expansé et sans expansion.

Dans ce type d'essais, on étudie le fretting fatigue entre deux plaques de l'assemblage. La plaque d'aluminium avec une épaisseur de 6 mm est assemblée avec l'autre plaque en acier avec une épaisseur de 3 mm par un boulon (Figure 2.17). La pièce munie des jauges est utilisée pour mesurer l'effort de serrage « effort normal » du boulon et de détecter l'amorçage de la fissure.

Les trous d'assemblage ont un diamètre de 10,5 mm pour les essais sans expansion. Pour les essais avec expansion, les trous sont expansés de 10,5 mm au 11,0 mm avec un degré d'expansion 4,5%. La procédure d'expansion est la même que pour l'essai de

fretting fatigue pour différents efforts normaux (éprouvettes avec un trou central suivi d'une expansion à 4.5%, mais sans polissage).

Le dispositif expérimental de montage a été conçu spécialement pour les essais sur des assemblages rivetés ou boulonnés. Ce dispositif assure l'alignement de l'axe de chargement.

2.7.2 Conditions expérimentales de chargement

Eprouvette	Charge moyenne (kN)	Amplitude de la charge (kN)	Effort normal (kN)	Expansion du trou
1_S	22,5	4,5	17	Non
2_E	22,5	4,5	17	4 ,5%
3_E	22,5	4,5	17	4 ,5%
4_S	22,5	4,5	17	Non

Tableau 2.7 Conditions de chargement pour les essais de fretting fatigue sur des assemblages boulonnés (Alu-Acier) avec un trou expansé et sans expansion.

Tous les essais sont réalisés à une fréquence de 30Hz.

III: RESULTATS EXPERIMENTAUX

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats expérimentaux. Il se divisera en deux parties :

Dans la première partie nous donnerons les résultats des essais de fatigue et de fretting fatigue pour les différentes configurations en terme de «durée de vie, de suivi de fissure, et des évolutions de paramètres d'essai,... »

Dans une deuxième partie nous présenterons les analyses micrographiques réalisées sur les échantillons testés avec les différentes configurations. Les analyses micrographiques nous permettront d'analyser et de comprendre les différents mécanismes induits par le fretting fatigue.

3.1 Résultats des essais

3.1.1 Résultats des essais de fatigue pour éprouvettes avec un trou central

- **Durée de vie de fatigue**

Les résultats de l'essai de fatigue pour éprouvettes avec un trou central sont donnés sur le tableau 3.1. On utilise la contrainte maximale nominale, qui est défini par la relation ci-dessous :

$$\sigma_{MAX-N} = \frac{F_{MAX}}{A} \quad (3.1)$$

F_{MAX} est la valeur maximale de la charge cyclique, et A est l'aire de la section transversale avec un trou central.

Pour l'éprouvette avec un trou central, la valeur de la contrainte maximale nominale est beaucoup plus petite que la valeur de la contrainte maximale. Ceci résulte de la concentration de la contrainte au bord du trou.

éprouvette	Contrainte maximale nominale (MPa)	Nombre de cycles à amorçage	Nombre de cycles à rupture (cycles)	Nombre de fissure
CF_3	100	-----	848 704	Pas d'amorçage
	130	22 246	55 757	1
C_9	145	64 000	88 594	2
CF_2	160	41 292	47 167	2
CF_1	200	-----	14 000	2

Tableau 3.1. Durée de vie de fatigue pour l'essai de fatigue avec les éprouvettes avec un trou central.

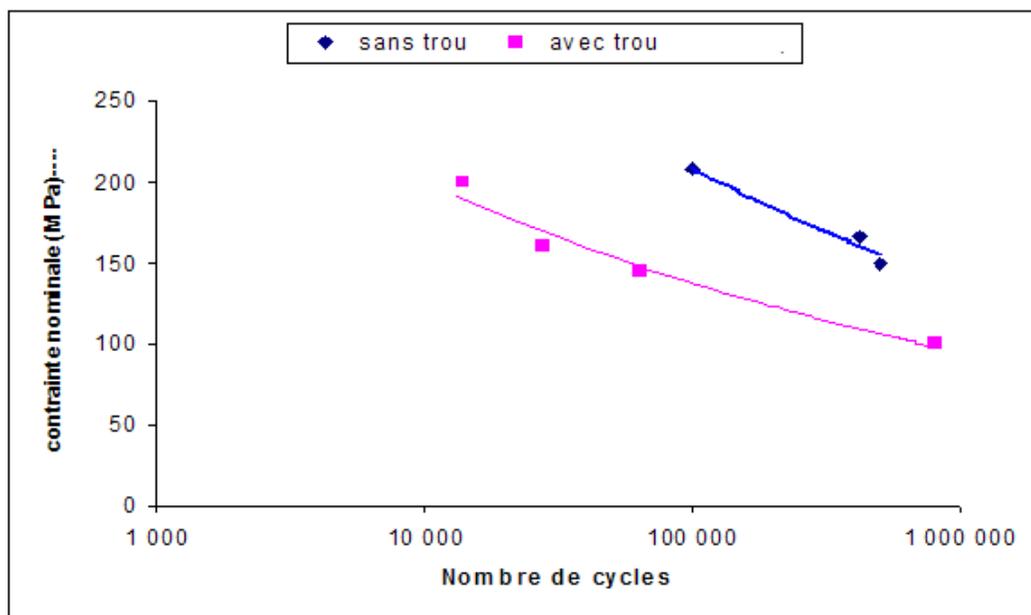


Figure 3.1. Courbes S-N des essais de fatigue avec les éprouvettes avec un trou central et d'essai fatigue avec l'éprouvette sans trou.

Les courbes S-N de durée de vie en fatigue des éprouvettes avec et sans trou central sont présentées sur la figure 3.1.

- **Suivi de fissure**

Pour l'essai de fatigue sur les éprouvettes avec un trou central, on utilise deux méthodes de suivi de fissure, le suivi avec les jauges de déformation et le suivi optique avec une camera comme mentionné au chapitre II. Les résultats de ces deux méthodes, (éprouvette CF_2), sont représentés par les termes de « signal de jauge » et « longueur de fissure » en fonction du nombre de cycles sur le tableau 3.2. et sur la figure 3.2.

Dans le tableau 3.2, avant l'amorçage, les jauges donnent une valeur de 1.94 (v), cette valeur est assez stable au cours d'essais. Au bout de 44316 cycles, la fissure s'est amorcée et propagée de plus de 2 mm que ce soit à gauche ou à droite du trou central (détection avec la camera). Au niveau du signal des jauges de déformation il passe d'une valeur de 1.94 (v) à une valeur de 2.3 (v). Les valeurs de la longueur de fissure à gauche et à droite du trou sont assez proches par contre les valeurs du signal des jauges différent un peu d'une jauge à une autre, ceci est dû vraisemblablement à l'alignement et leur position par rapport au centre du trou ainsi qu'à la déviation de la trajectoire de la fissure.

Nombre de cycles	Longueur de fissure à gauche du trou (mm)	Signal de jauge gauche (V)	Longueur de fissure à droite du trou (mm)	Signal de jauge droite (V)
0	0	1,94	0	1,98
41292	0	1,87	0	1,94
44316	2,5	2,22	2,3	2,3
45324	4,3	2,65	4,2	2,8
45832	5,6	3,05	5,5	3,3
46342	6,6	3,85	6,5	4,3
46951	8,0	7,02	7,8	10
47167	9,0	12	9,3	25

Tableau. 3.2 Suivi de fissure pour l'éprouvette CF_2

La figure 3.2.a) montre l'évolution de signal des jauges à gauche et à droite du trou central. Sur la figure 3.2.c), nous pouvons observer la détection de l'amorçage de deux

fissures autour de 41292 cycles. Après amorçage, le signal des deux jauges augmente sensiblement avec l'accroissement de la fissure (figure 3.2.b).

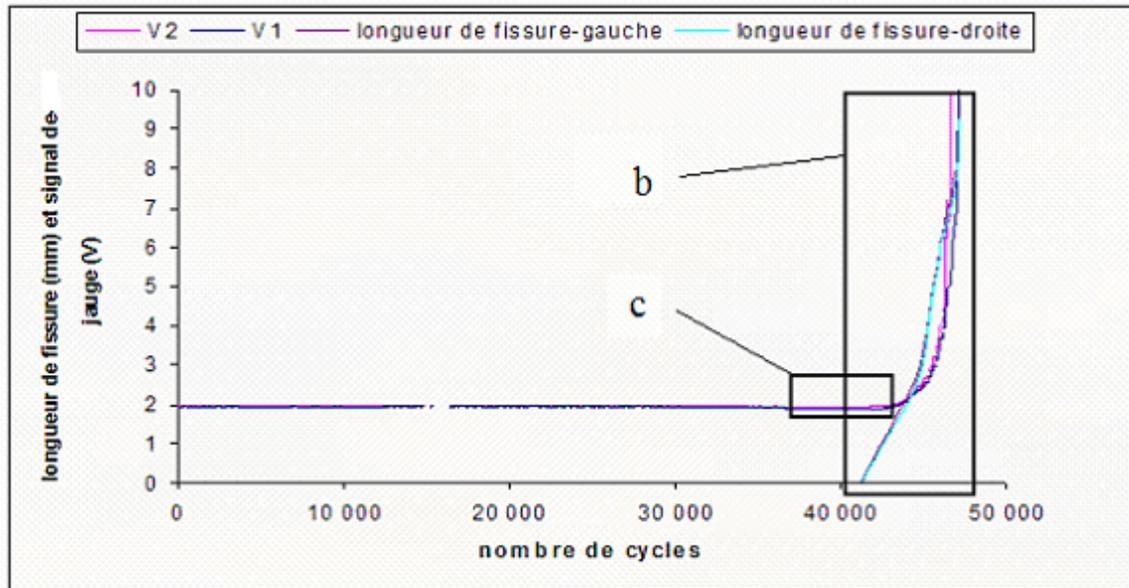


Figure 3.2.a) Evolution de signal des jauges 1 et jauge 2 et longueur de fissure gauche et fissure droite pour l'éprouvette CF_2.

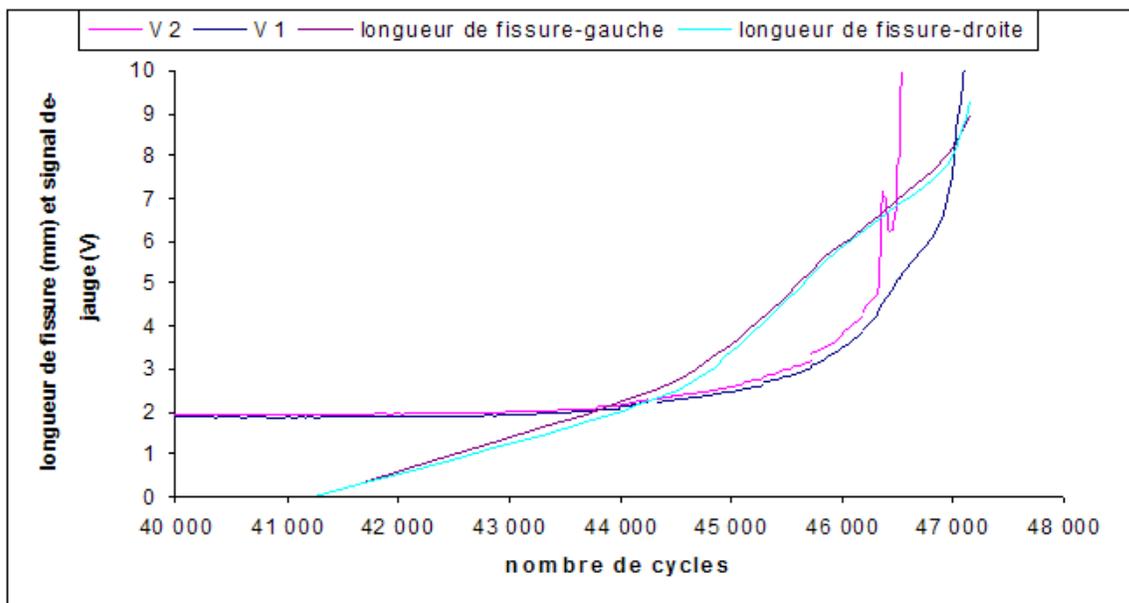


Figure 3.2.b) Partie b : propagation de fissure.

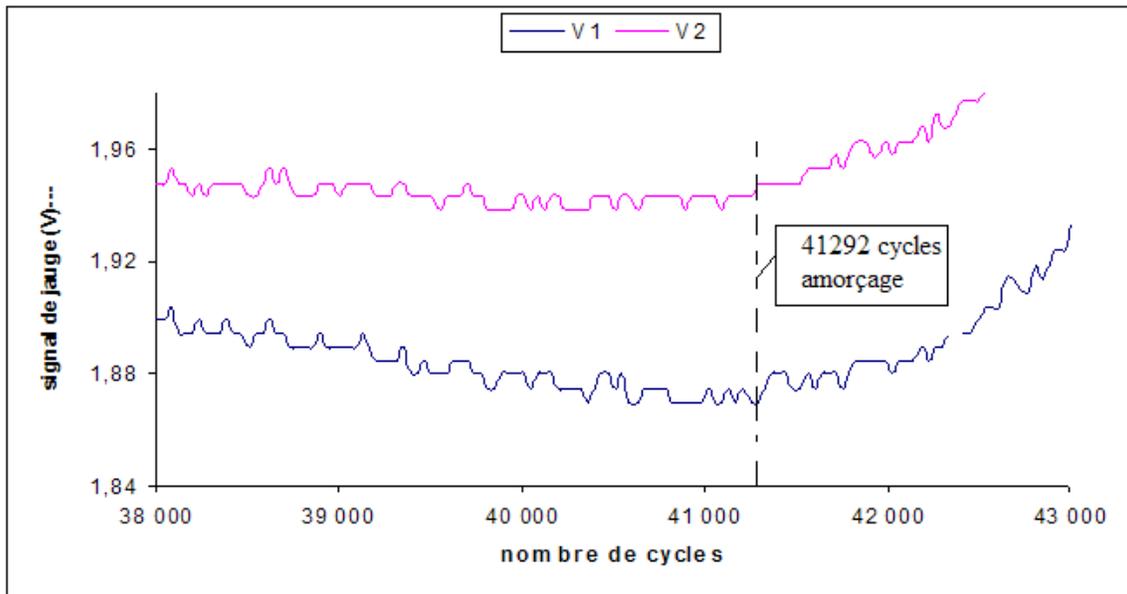


Figure 3.2.c) Partie c : amorçage de fissure.

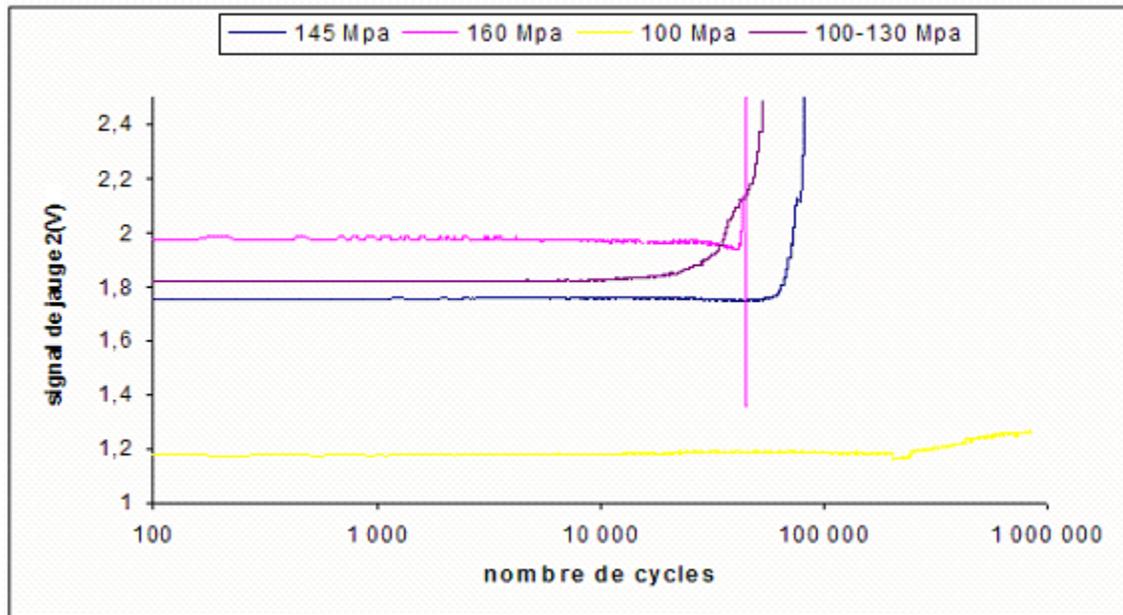


Figure 3.3. Evolution de signal des jauges pour les essais sous différentes charges cyclique. .

La figure 3.3 montre l'évolution de signal de la jauge pour les essais pour différentes

charges cycliques. Quant la charge croît de 100 MPa à 145 MPa, et à 160MPa, le signal de la jauge au début de l'essai croît linéairement par rapport à la charge cyclique de 1,17 à 1,75, et à 1,99.

Dans figure 3.3, notons que pendant la phase de propagation, la vitesse de croissance du signal augmente avec l'augmentation de la charge(elle-ci doit être liée à la vitesse de propagation).

3.1.2 Résultats des essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux sur des éprouvettes avec un trou central.

3.1.2.1 Durée de vie de fretting fatigue

Les résultats des essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux sur des éprouvettes avec un trou central sont donnés sur le tableau 3.3. Le dernier essai (éprouvette C_2) est réalisé avec une valeur de 130MPa de contrainte maximale nominale, mais les autres sont réalisés avec une valeur de 145MPa. Le premier essai (éprouvette C_9) est réalisé sans effort normal et les autres sont réalisés avec différents efforts normaux de 4 kN à 12 kN.

Eprouvette	Contrainte maximum nominale (MPa)	Effort Normale nominal e (kN)	Effort normale vraie (kN)	Nombre de cycle à fracture (ou large fissure)	Nombre de cycle à amorçage
C_9	145	0	0	88 594	64 000
C_7	145	4	4,2	282 756	246 000
C_6	145	6	6,0	537 067	500 000
C_1	145	8	7,7	823 809	770 000
C_16	145	10	9,6	636 179	608 000
C_8	145	12	11,5	688 722	663 000
C_2	130	8	7,7	914 150	860 000

Tableau 3.3 Durée de vie de fatigue pour l'essai de fretting fatigue pour différents efforts normaux sur des éprouvettes avec un trou central.

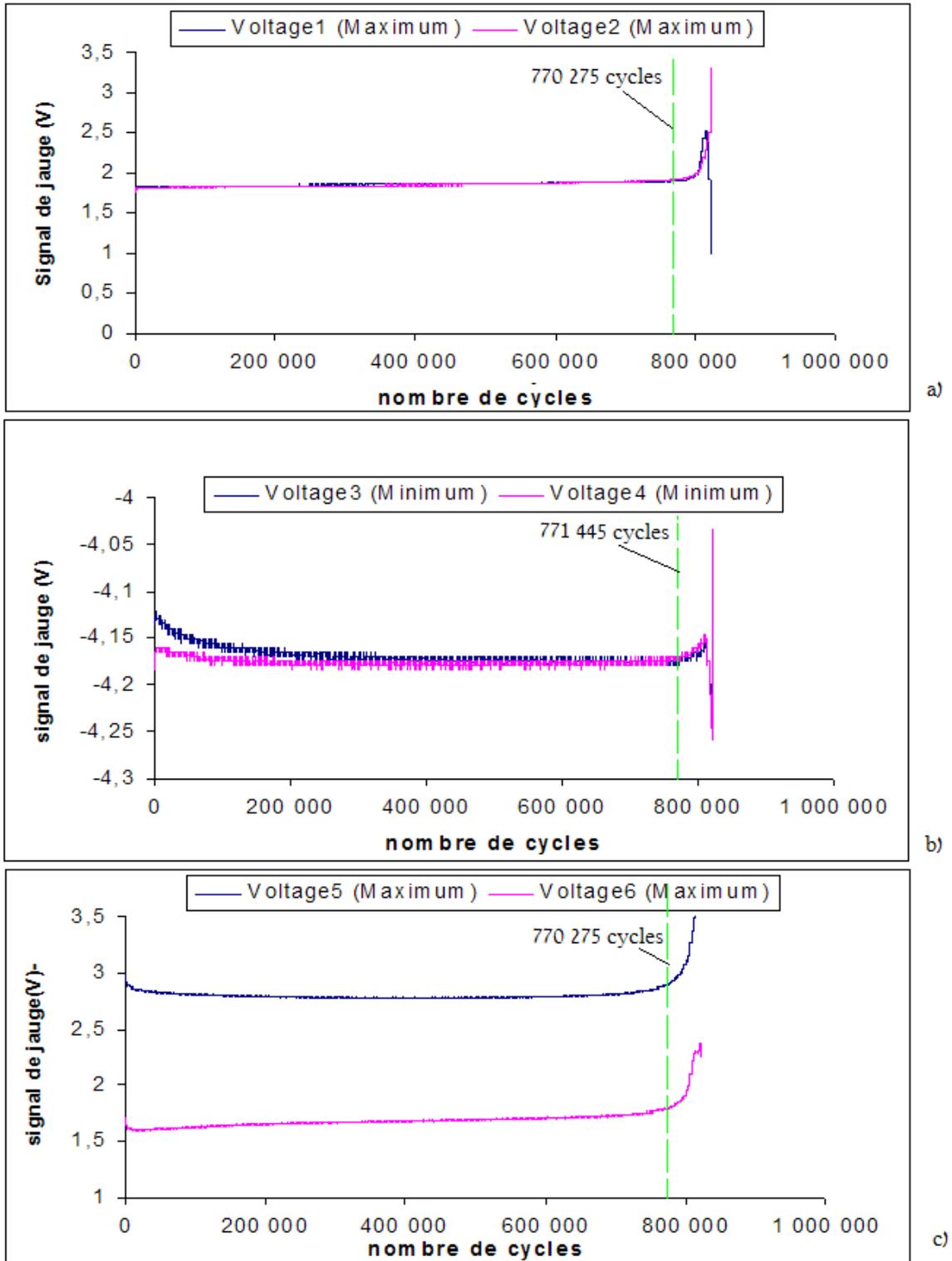


Figure 3.4 Identification de l'amorçage par l'évolution de signal des jauges. a) jauges 1 et 2, b) jauges 3 et 4, c) jauges 5 et 6.

Pour identifier l'amorçage, on suit l'évolution de signaux de jauges comme indiquées dans le chapitre précédent. La figure 3.4 présente l'identification de l'amorçage. Notons que le nombre de cycles identifié par les jauges 1 et 2, les jauges 3 et 4, et les jauges 5 et 6 sont un peu différents, la différence n'est pas importante. On peut utiliser le signal des jauges 5 et 6 pour détecter l'amorçage de la fissure.

La durée de vie (nombre de cycles à amorçage) en fretting fatigue est présentée en fonction de l'effort normal sur la Figure 3.5. Nous remarquons que la mise en contact avec un effort normal accroît significativement la durée de vie en fatigue. Avec une valeur de l'effort normal de 4 kN, la durée de vie en fatigue représentée par le nombre de cycles augmente d'un facteur 4 (de 64000 à 246000 cycles). Sur cette figure, nous observons que la durée de vie augmente sensiblement avec l'accroissement de l'effort normal de 4 kN à 12 kN (de 246000 à 663000 cycles).

Pour la même valeur de l'effort normal de 8 kN, la durée de vie en fretting fatigue d'essai avec 130 MPa de contrainte cyclique est plus élevée que celle avec 145 MPa.

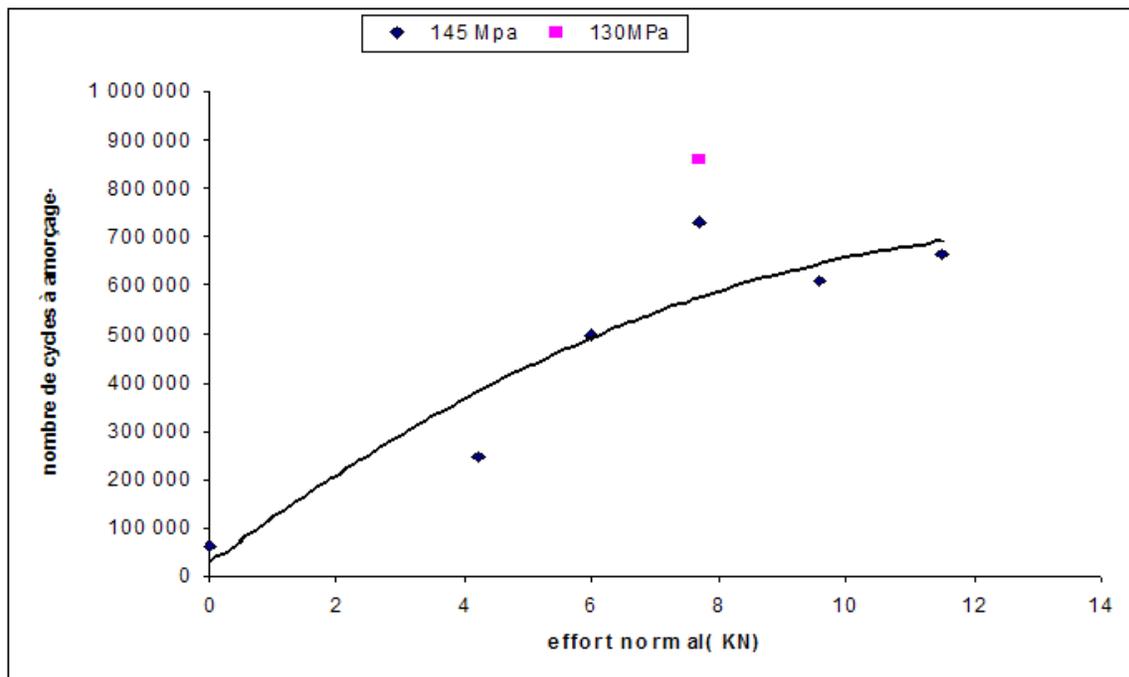


Figure 3.5 Evolution de la durée de vie en fretting fatigue en fonction de l'effort normal.

3.1.2.2 Suivi de processus d'essai

- Effort normal (signal 3 et 4)

Les évolutions de l'effort normal moyen et de l'amplitude de l'effort normal sont données sur figure 3.6 et figure 3.8 respectivement. Sur la figure 3.6, les efforts normaux moyens semblent sensiblement constants pendant toute la durée de vie de fretting fatigue. Une analyse plus fine de ces évolutions (figure 3.7), montre que la valeur de l'effort normal n'est pas constante tout le long de l'essai de fretting fatigue. Cette évolution représentée sur un graphe avec une échelle logarithmique sur l'axe des abscisses, montre une croissance continue (de quelques dizaines) de l'effort normal qu'on peut diviser en deux phases. Cette évolution est à relier vraisemblablement aux conditions de contact statique ou dynamique, car si on compare l'évolution des signaux des jauges lors de l'essai de fatigue sans fretting, nous n'observons pas ce phénomène.

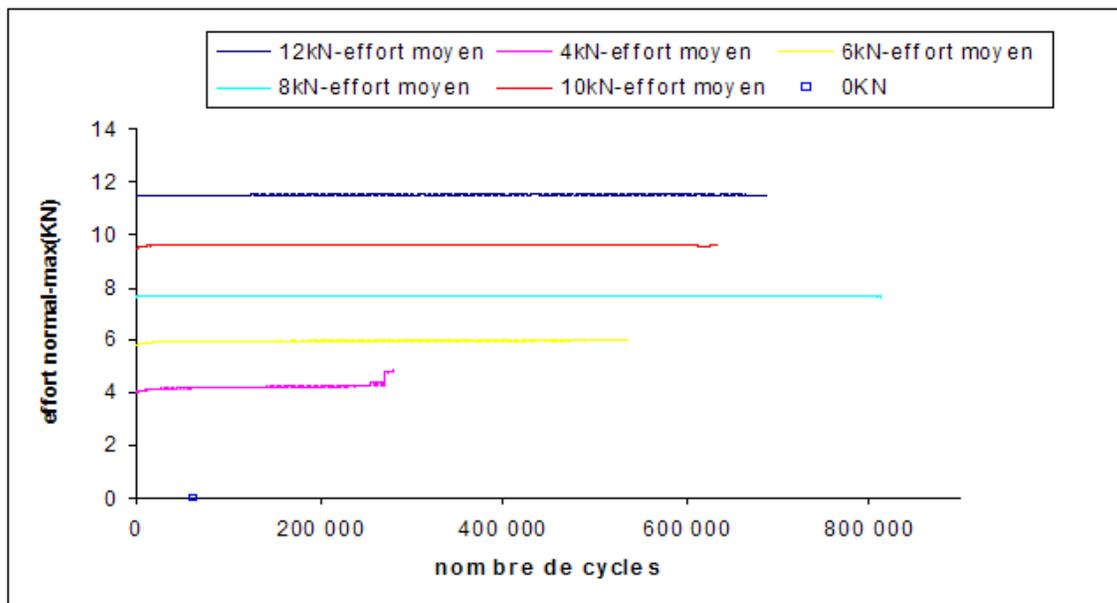


Figure 3.6 Evolution de l'efforts normaux (valeur moyenne) pour les essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux sur des éprouvettes avec un trou central.

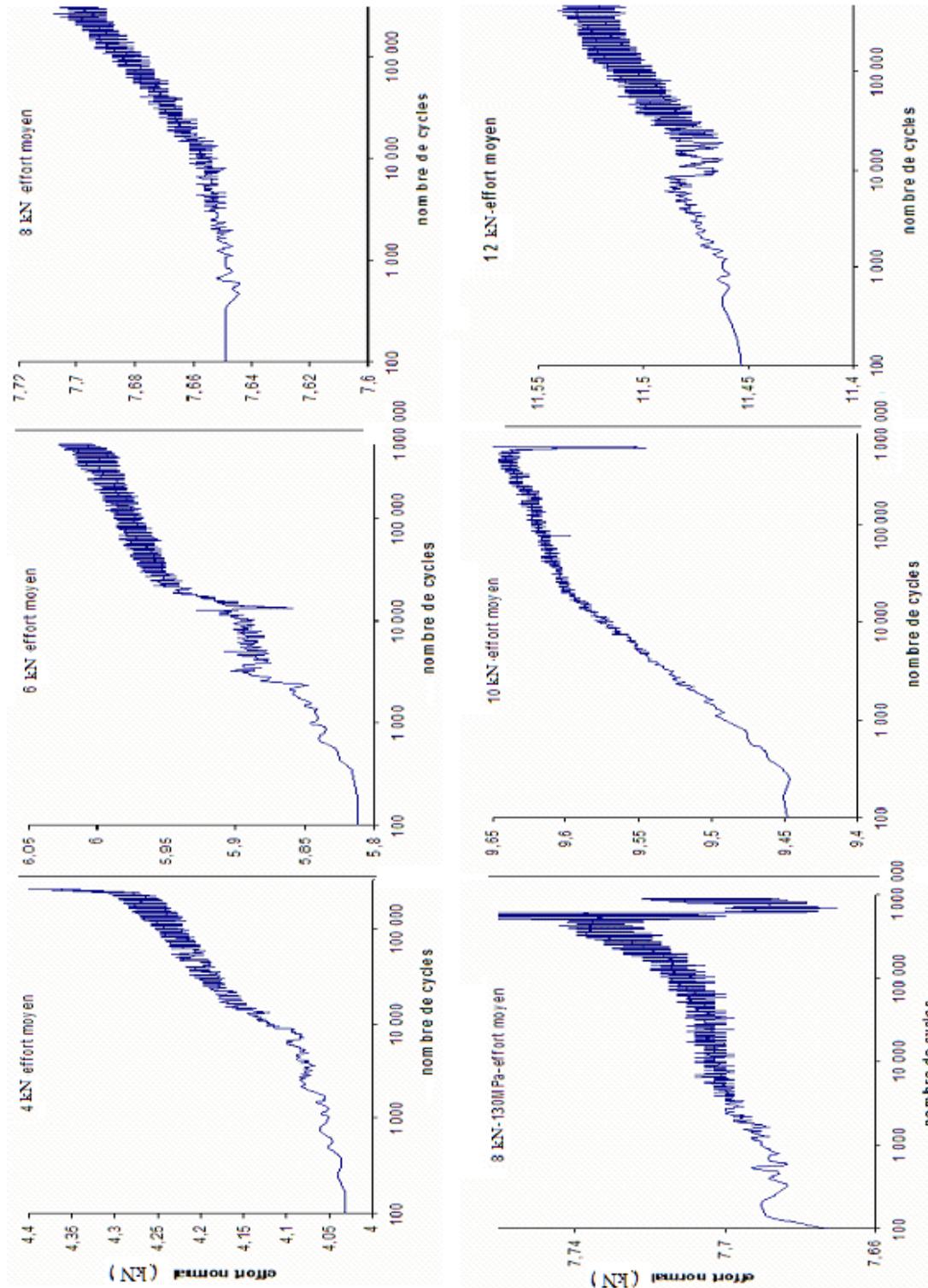


Figure 3.7 Evolution de l'efforts normaux (valeur moyenne) pour les essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux sur des éprouvettes avec un trou central avec une échelle logarithmique sur l'axe des abscisses.

La figure 3.8 montre que l'amplitude de l'effort normal augmente très peu au début de l'essai pour se stabilisée après juste avant l'amorçage de la fissure. Lors de l'amorçage et durant la phase de propagation de la fissure, l'amplitude de l'effort normal croît sensiblement avec la croissance de la longueur de la fissure.

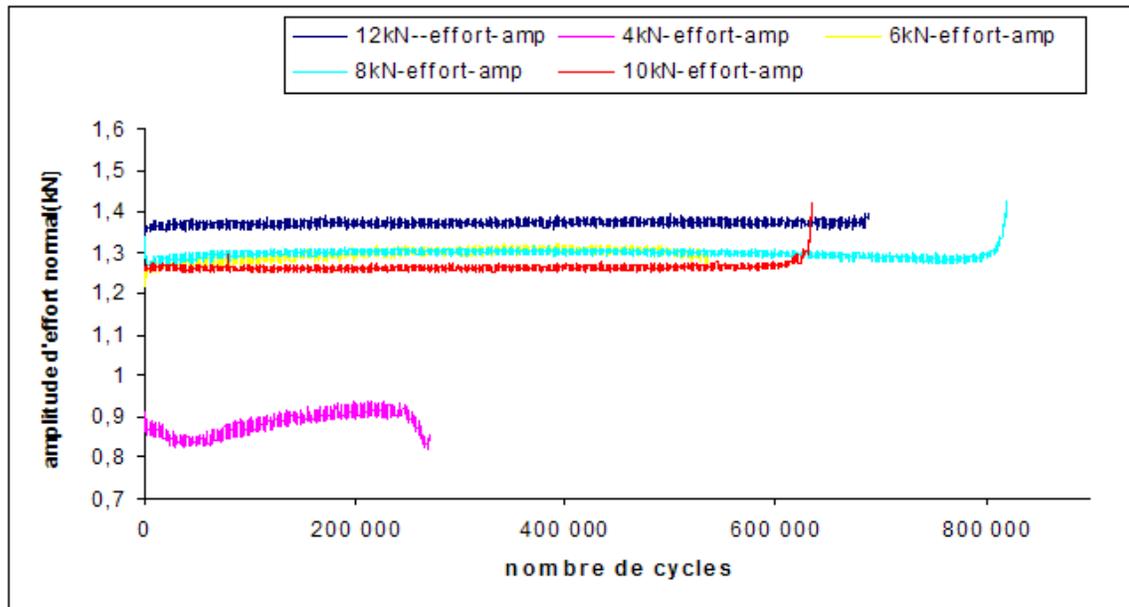


Figure 3.8 Evolution de l'amplitude des efforts normaux pour les essais de fretting fatigue sur des éprouvettes avec un trou central.

Les figures 3.9 et 3.10 présentent la comparaison de l'évolution de l'effort et l'amplitude de l'effort normal entre les deux essais avec des charges cycliques de 130 et 145 MPa avec un effort normal de 8 kN. Nous remarquons que la plus grande valeur de charges cycliques donne la plus grande valeur d'amplitude de l'effort normal.

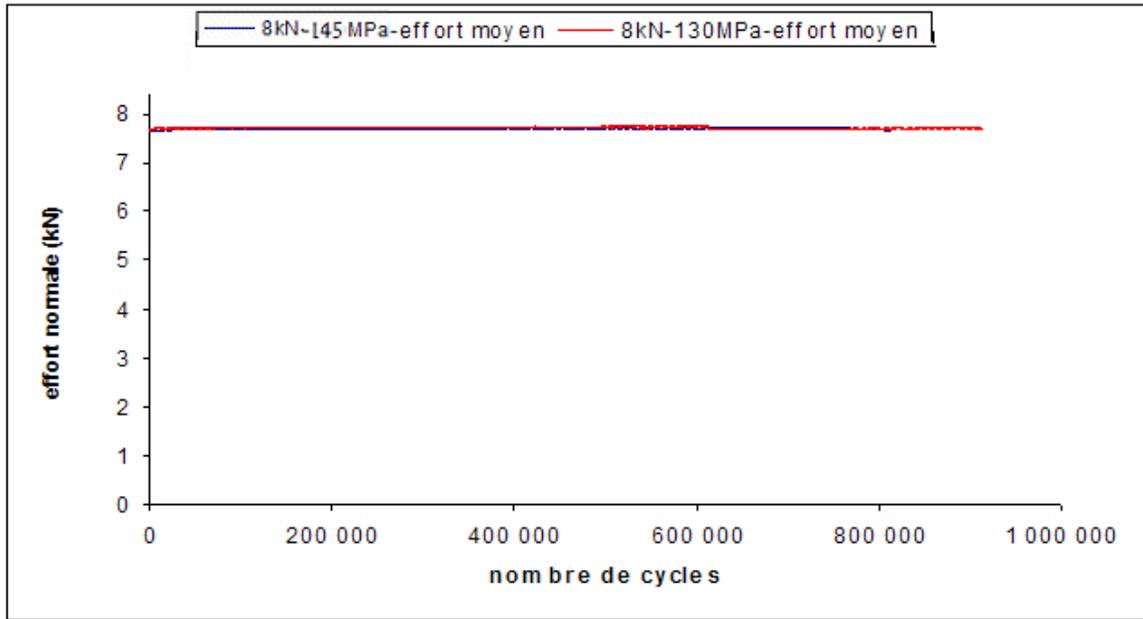


Figure 3.9 Evolution de l'efforts normaux pour les essais de fretting fatigue pour le même effort normal de 8kN mais différentes charges cycliques.

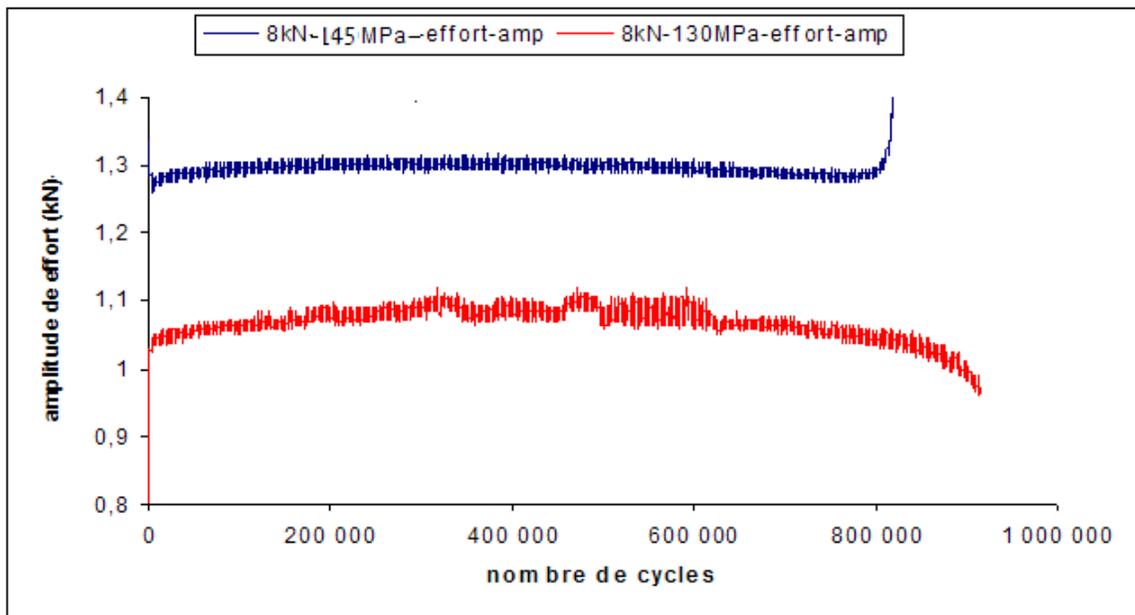


Figure 3.10 Evolution d'amplitude de l'efforts normaux pour les essais de fretting fatigue pour même effort normal de 8kN mais différentes charges cycliques.

- Déformation de l'éprouvette (jauge 1 et jauge 2)

La figure 3.11 montre l'évolution de déformation de l'éprouvette (jauge 1) avec les différents efforts normaux. L'évolution des signaux avec et sans efforts normaux n'est pas semblable. La déformation, sans effort normal (0 kN), reste constante durant l'essai de fatigue, par contre celle avec des efforts normaux présente une croissance continue.

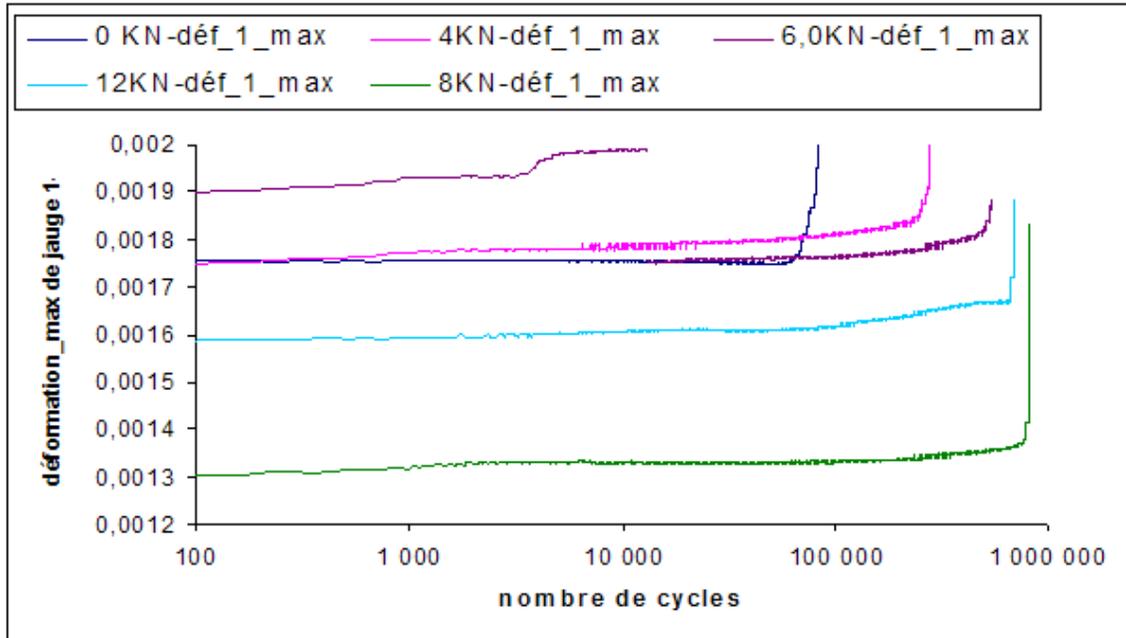


Figure 3.11 Evolution de déformation de l'éprouvette (jauge 1) en fonction de nombre de cycles.

La représentation de cette évolution sur un graphe avec une échelle logarithmique sur l'axe des abscisses montre que cette croissance se divise en trois phases distinctes comme l'indique la figure 3.12.

Durant la première phase, avant le point A, la déformation croît sensiblement. Cette phase correspond au processus d'adaptation (rodage) entre les deux surfaces de contact au début d'essai de fretting fatigue. La durée de cette phase est d'environ 3000 cycles. Au point A, la vitesse de croissance de déformation prend une valeur constante.

Durant la seconde phase, entre le point A et le point B, comme indiqué sur la figure 3.12, l'évolution de la déformation reste sensiblement constante (ou varie très peu).

Le point B marque l'amorçage de la fissure, et l'évolution de la déformation présente

une croissance très rapide jusqu'à la fin de l'essai. Cette troisième phase représente la phase de propagation de la fissure.

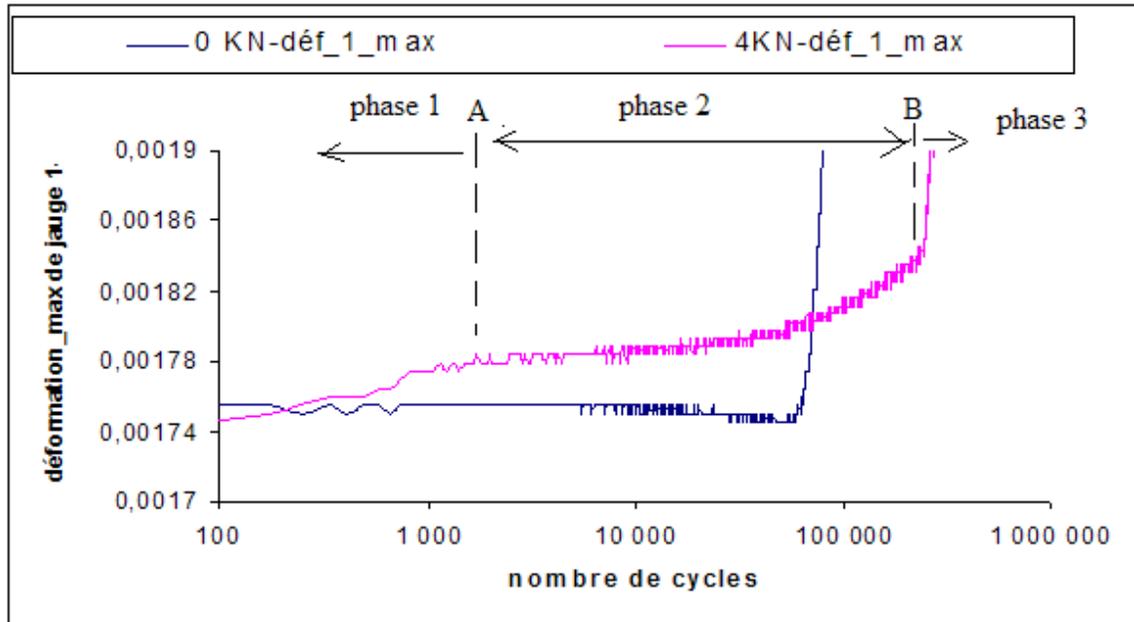


Figure 3.12 Comparaison des évolutions de déformation de l'éprouvette (jauge 1) entre l'essai sans effort normal (sans contact) et l'essai avec 4kN d'effort normal.

Essai (effort)	Déformation de jauge 1	Déformation de jauge 2	Valeur moyenne entre jauge 1 et jauge 2
0 kN	0,00176	0,00169	0,001725
4 kN	0,00175	0,00155	0,001650
6 kN	0,00190	0,00149	0,001695
8 kN	0,00130	0,00128	0,001290
12 kN	0,00159	0,00161	0,001600

Tableau 3.4 Valeur initiale de déformation des jauge 1 et jauge 2 dans l'essai de fretting fatigue.

La figure 3.13 montre la comparaison de l'évolution de la déformation des jauge 1 et 2. Les courbes des deux jauges présentent les mêmes tendances. Les différentes

variations entre les valeurs initiales des jauges sont dues vraisemblablement aux conditions initiales qui sont le collage, le soudage des fils et l’alignement des jauges par rapport au trou central. Pour l’essai avec 8kN, les valeurs de la déformation au début d’essai sont assez éloignées des autres cas (tableau 3.4), ceci nous emmène à un questionnement sur l’influence de l’effort normal sur cette valeur initiale. Ce constat n’existe pas pour les autres valeurs des efforts normaux.

La figure 3.14 présente les évolutions des amplitudes de déformation des jauges 1 et 2 des éprouvettes des essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux sur des éprouvettes avec un trou central.

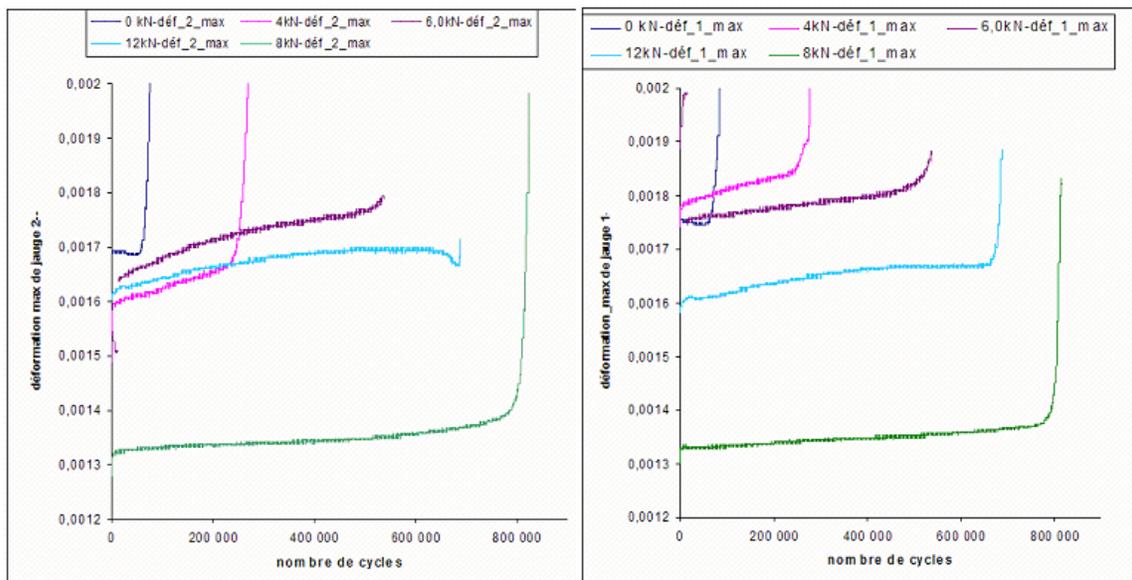


Figure 3.13 Comparaison de l’évolution de déformation de l’éprouvette entre jauge 1 et jauge 2.

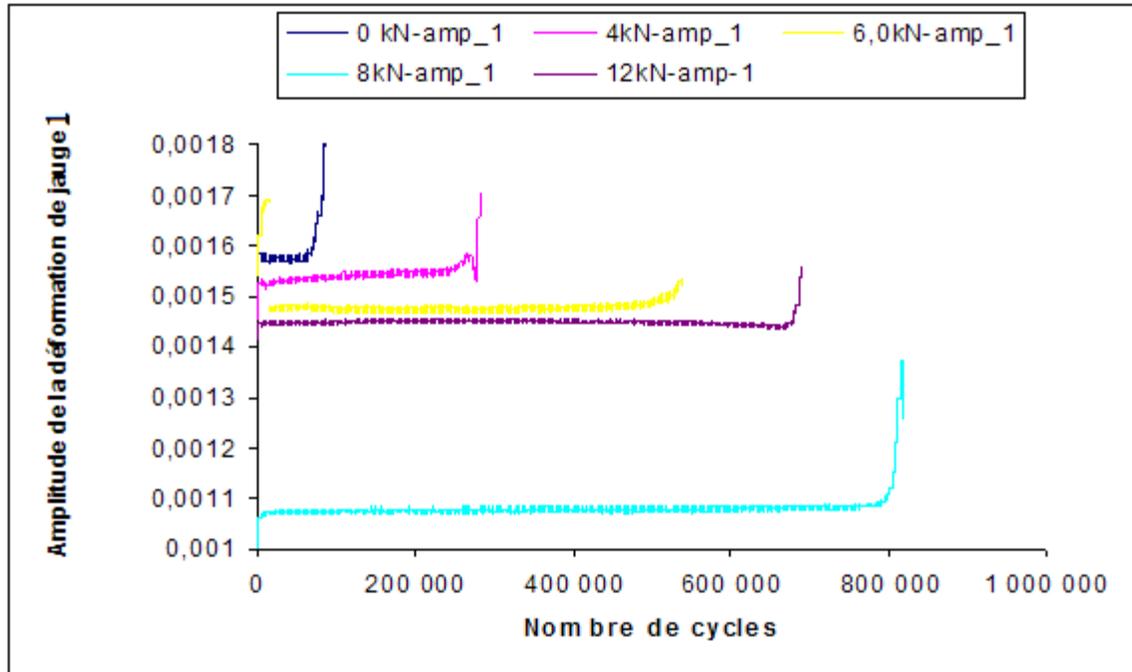


Figure 3.14 a) Evolution d'amplitude de déformation jauge1 pour les essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux.

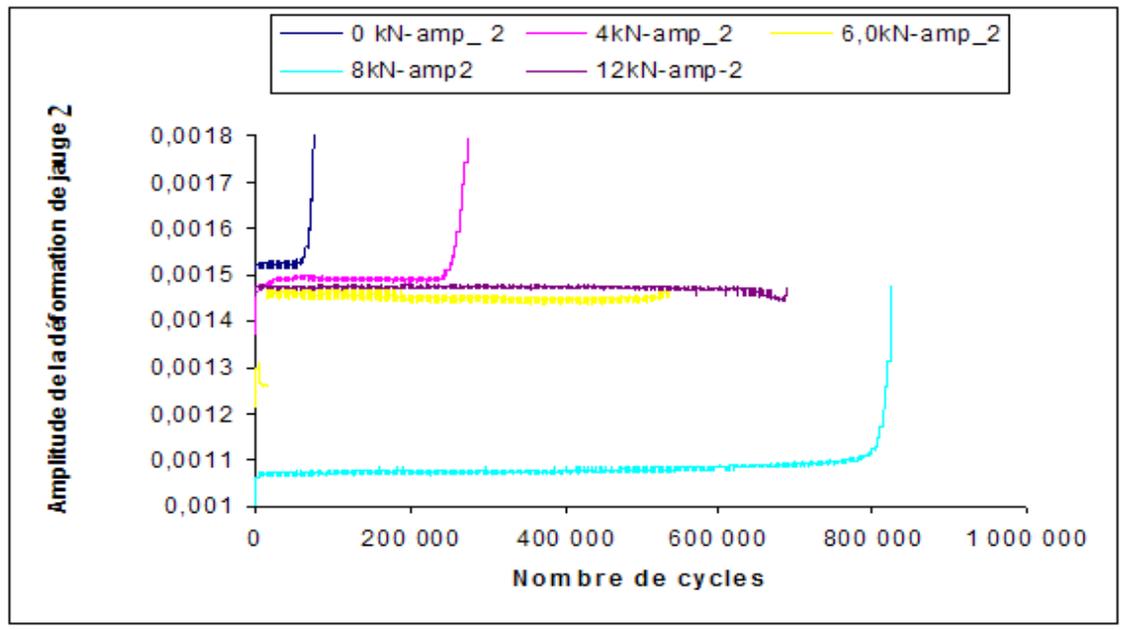


Figure 3.14 b) Evolution d'amplitude de déformation 2 pour les essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux.

- Signal de jauges 5 et 6.

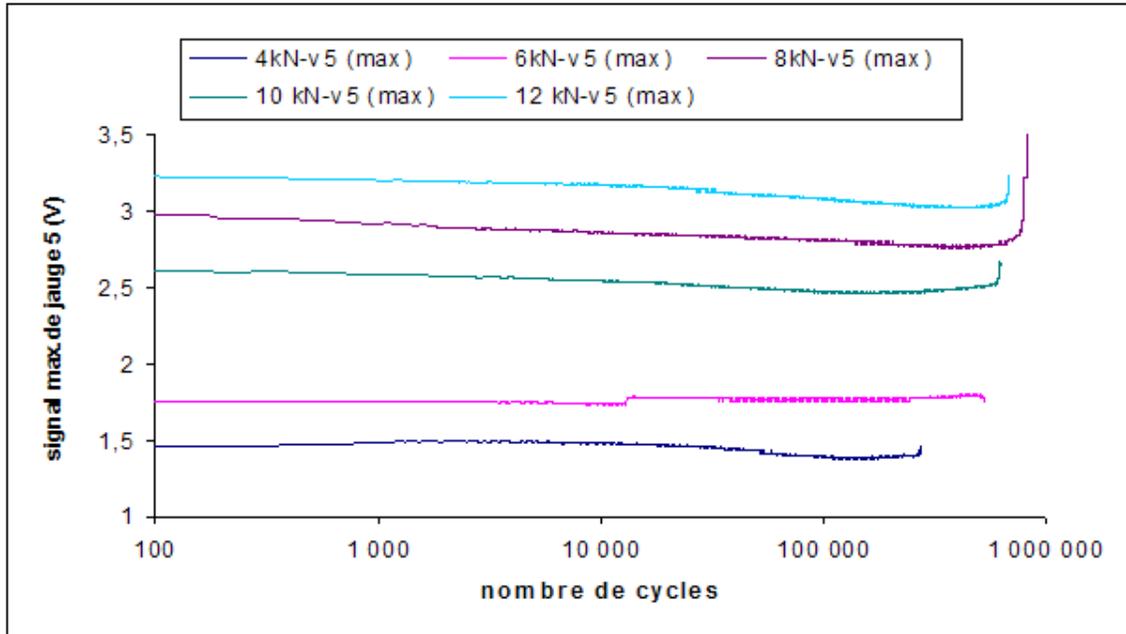


Figure 3.15 a) Evolution de signal de jauge de déformation (5) en fonction de nombre de cycles.

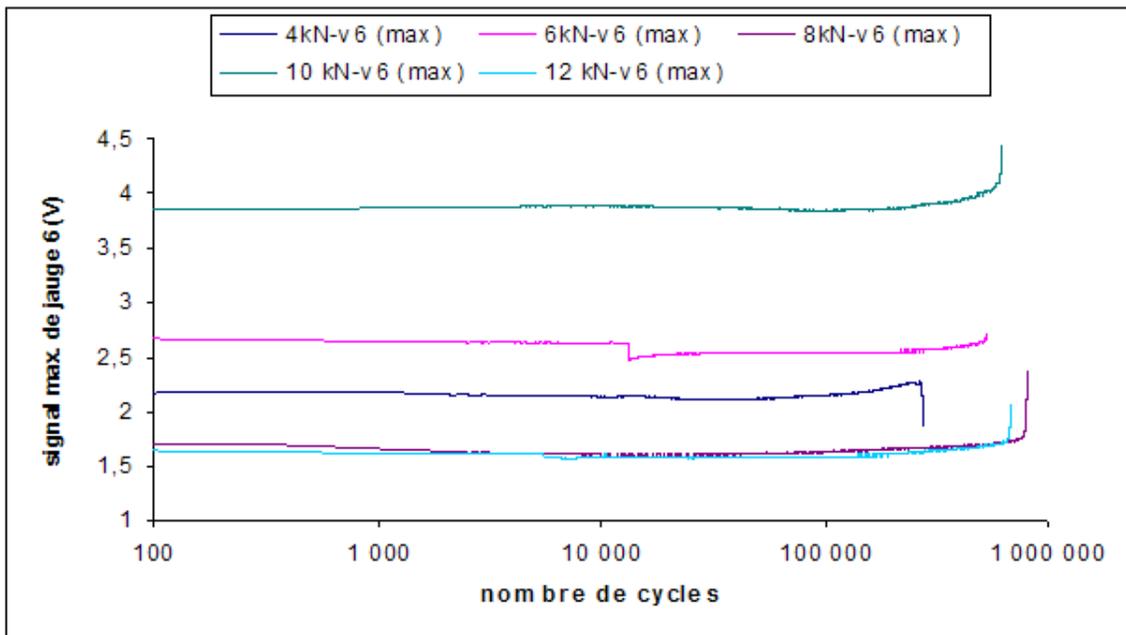


Figure 3.15 b) Evolution de signal de jauge de déformation (6) en fonction de nombre de cycles.

Les figures 3.15 a) et b) montrent les évolutions de signaux des jauges 5 et 6. On remarque que les courbes de signal présentent aussi 3 phases : la première phase présente une stabilité du signal, la deuxième phase donne une décroissance du signal et la troisième phase, une croissance de celui-ci.

3.1.3 Essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux sur des éprouvettes avec un trou central suivi d'une expansion à 4.5%

3.1.3.1 La durée de vie en fretting fatigue

Eprouvette	Contrainte maximale nominale (MPa)	Effort Normal nominal (kN)	Effort normal vrai (kN)	Nombre de cycles à rupture	Nombre de cycles à l'amorçage
C_15E	145	1,5	1,4	171 082	116 400
C_10E	145	4	4,7	400 220	365 000
C_4E*	145	4	4,4	451 290	418 000
C_3E*	145	8	7,7	324 887	283 000
C_11E	145	8	7,7	640 247	600 800
C_14E	145	10	9,8	----	>741 188
C_5E	145	12	11,5	415 469	375 000
C_12E	145	12	12	833920	795 000

Tableau 3.5 Durée de vie en fretting fatigue pour différents efforts normaux sur des éprouvettes avec un trou central suivi d'une expansion à 4.5%. (* polissage sur seule face de la sortie, les autres sur 2 faces)

Les résultats en termes de durée de vie de ces types d'essais sont donnés sur le tableau 3.5 et aussi sur la figure 3.16 avec les différentes valeurs de l'effort normal. Sur la figure 3.16, nous notons que pour les essais réalisés sur des échantillons avec un polissage sur les deux faces après l'opération d'expansion, la durée de vie de fretting fatigue présente une évolution linéaire en fonction de l'effort normal de 1,5 kN à 10 kN, et présente une stabilité après la valeur de 10 kN et 12kN. Les résultats des essais avec

un polissage sur une seule face (face de la sortie) présentent des dispersions, en effet, la durée de vie avec un effort normal de 8 kN est moins élevée que celle avec 4kN. Sur cette figure nous observons que le polissage sur une face ou deux faces n'ont pas la même incidence que l'on est un effort normal de 4 kN ou 8 kN. Cette opération de polissage était incontournable pour pouvoir éliminer le bourrelet dû à l'opération d'expansion afin de garantir un contact entre les deux surfaces. Cette opération de polissage a pour conséquence l'élimination et la relaxation des contraintes résiduelles induites par l'expansion comme.

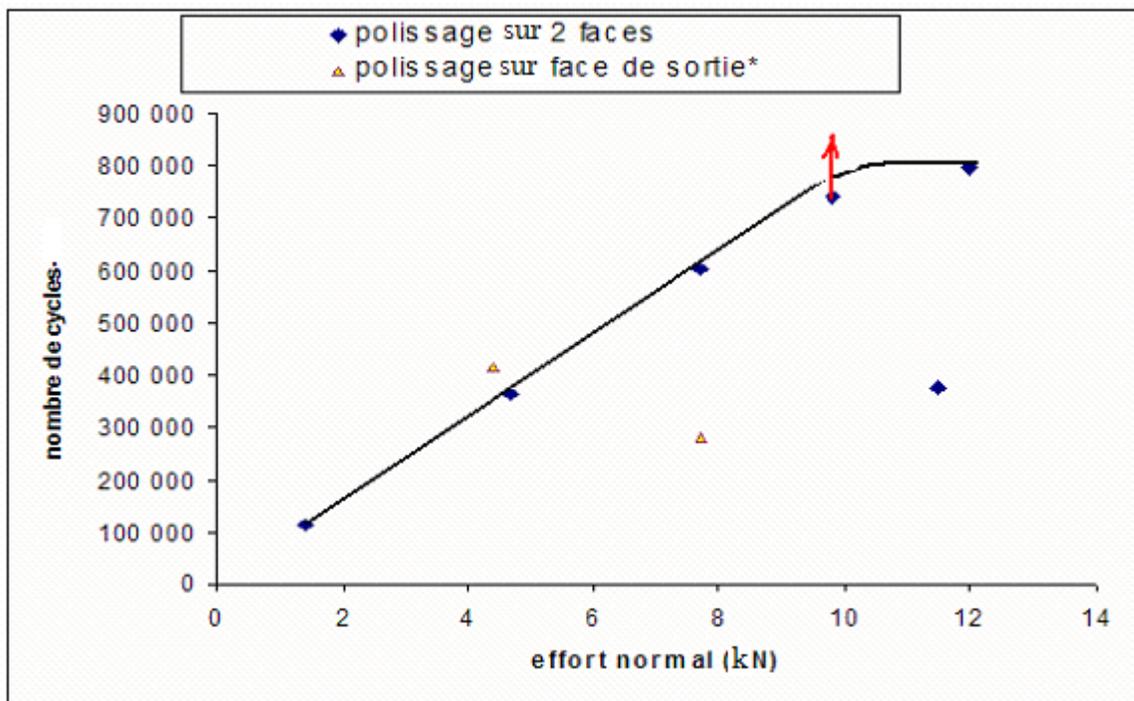


Figure 3.16. Durée de vie de fretting fatigue en fonction de l'effort normal pour les essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux sur des éprouvettes avec un trou central suivi d'une expansion à 4.5%.

3.1.3.2 Le suivi de processus d'essai

- Effort normal

Les évolutions de l'effort normal moyen sont données sur la figure 3.17 et 3.18. Sur la figure 3.17, les efforts normaux moyens sont assez constants pendant toute la durée de

vie de fretting fatigue. Comme dans la configuration sans expansion, une analyse plus fine de ces évolutions (figure 3.18), montre que la valeur de l'effort normal n'est pas constante tout le long de l'essai de fretting fatigue. Cette évolution représentée sur un graphe avec une échelle logarithmique sur l'axe des abscisses, montre une croissance continue (de quelques dizaines) de l'effort normal qu'on peut diviser en deux phases. Cette évolution est à relier vraisemblablement aux conditions de contact statique ou dynamique, car si on compare l'évolution des signaux des jauges lors de l'essai de fatigue sans fretting, nous n'observons pas ce phénomène. Pour le cas avec un effort normal de 10 kN, nous avons un comportement différent des autres cas (4, 8, 12 kN). En effet, dans cet essai, il n'y a pas de amorçage de fissure.

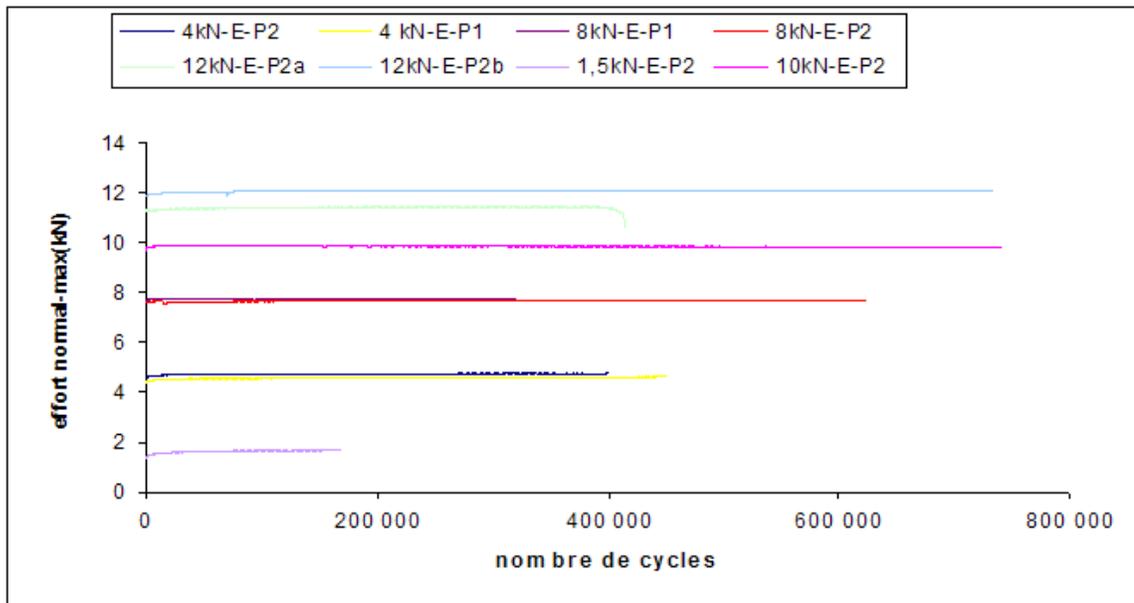


Figure 3.17 Evolution de l'effort normal pour les essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux sur des éprouvettes avec un trou central suivi d'une expansion à 4.5%. (E : avec expansion, SE : sans expansion, P1 : polissage sur une face, P2 : polissage sur deux faces)

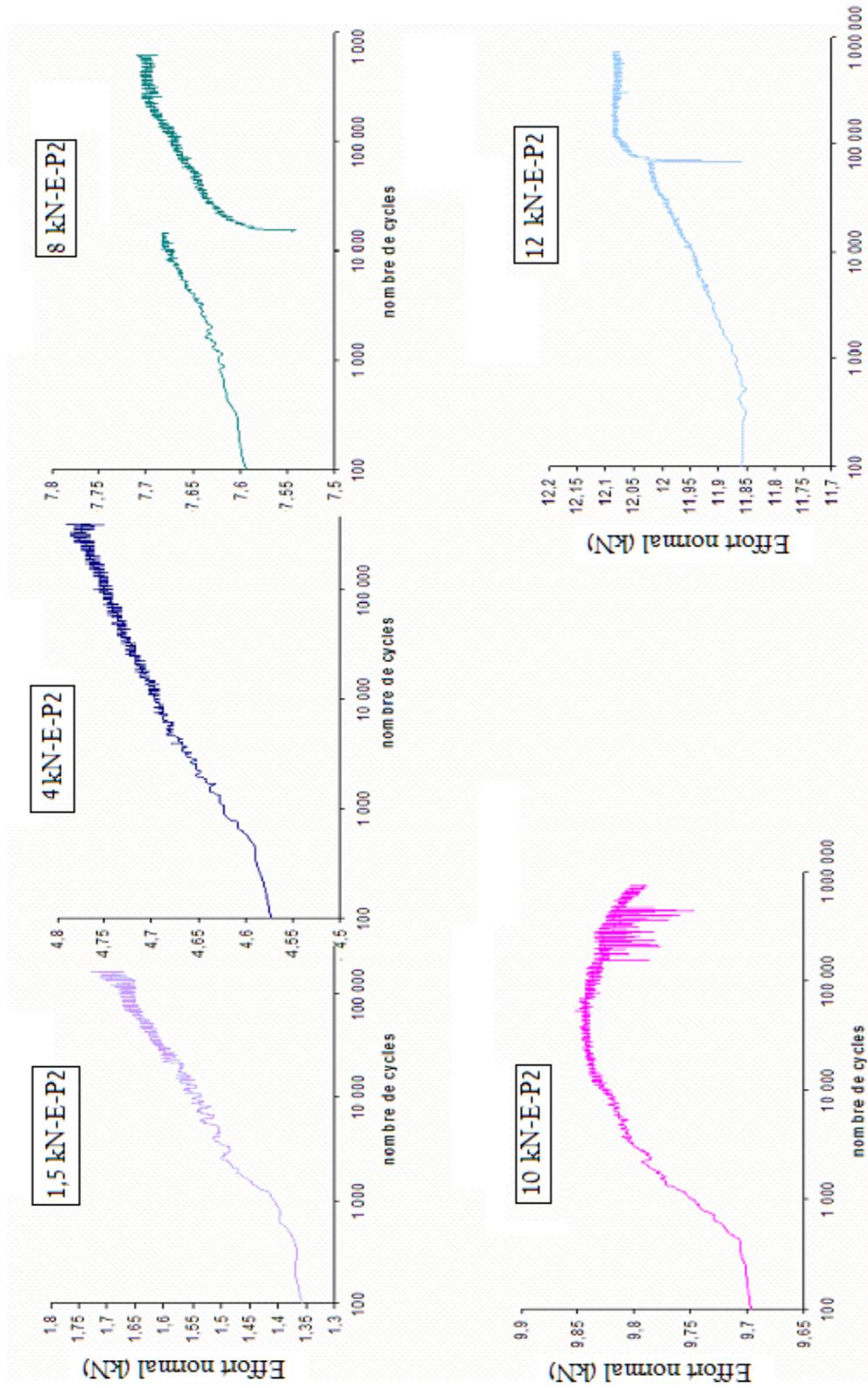


Figure 3.18 Evolution de l'effort normal pour les essais avec des éprouvettes avec polissage sur deux surfaces.

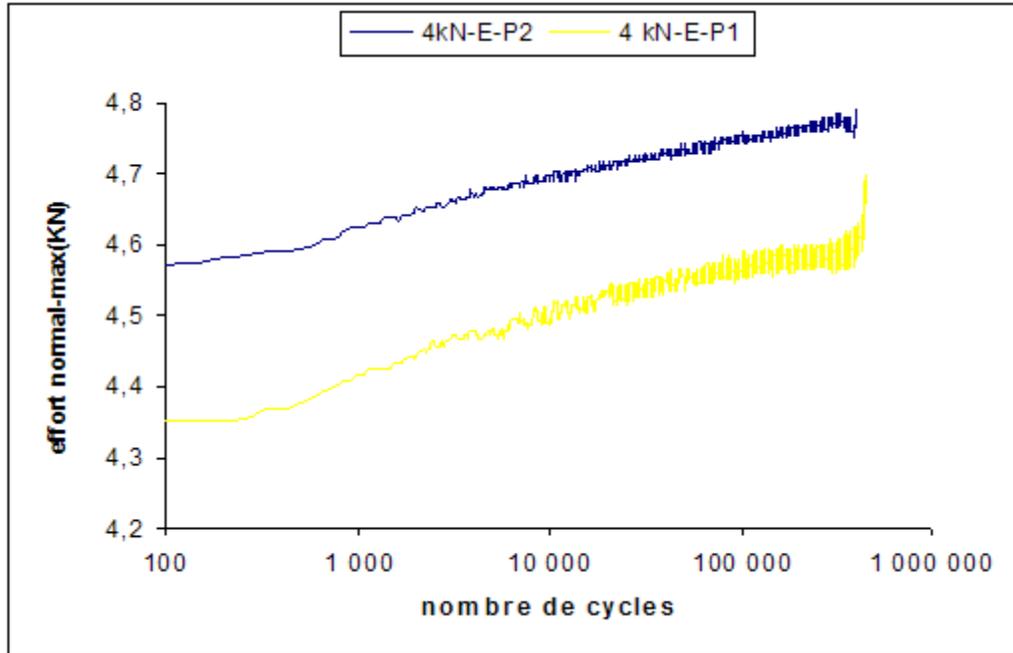


Figure 3.19 Evolution de l'effort normal pour les essais avec des éprouvettes avec polissage sur deux faces et sur une face avec la même valeur de l'effort normal de 4kN.

La figure 3.19 présente les comparaisons entre les évolutions de l'effort normal des essais avec polissage sur deux faces et des essais avec polissage sur une face avec la même valeur de l'effort normal. Les deux courbes présentent la même évolution. Les valeurs initiales sont différentes, la déformation initiale pour le cas du polissage sur les deux faces est plus élevée que pour le cas avec polissage sur une face. Ce constat nous emmène à penser que pour le cas d'un polissage sur une face, que les contraintes résiduelles ne sont pas totalement relaxées ou bien leur niveau est plus élevé que le cas avec polissage sur deux faces.

- Déformation de l'éprouvette (jauge 1 et jauge 2)

La figure 3.20, montre l'influence de l'effort normal sur la durée de vie par l'intermédiaire des jauges collées sur l'échantillon. L'effort normal augmente plus la durée de vie augmente.

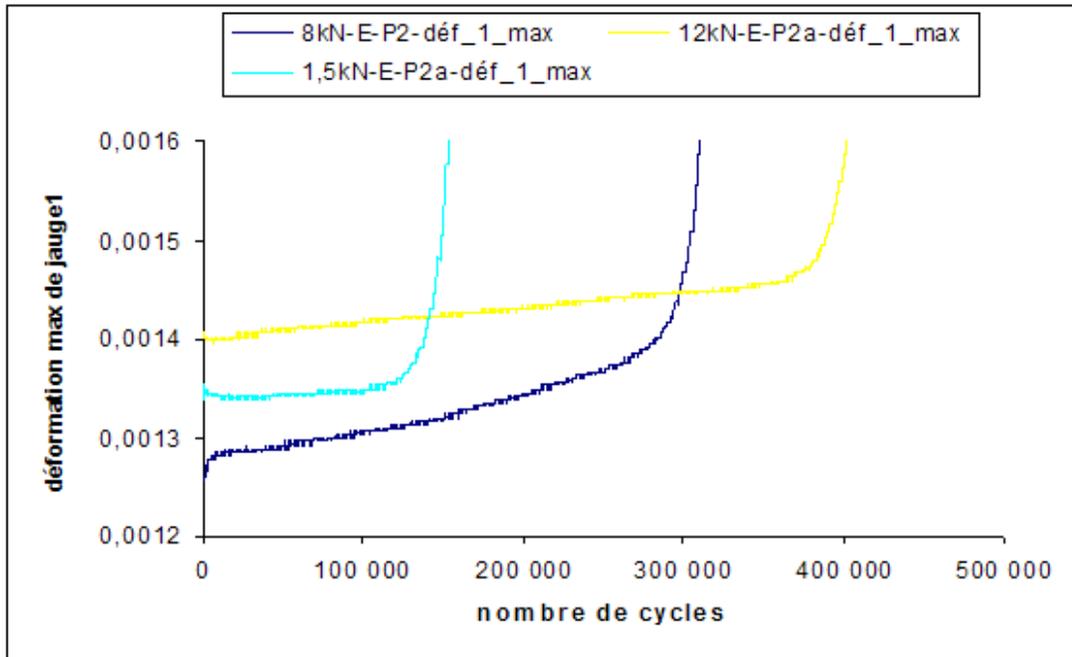


Figure 3.20 Evolution de la déformation de jauge 1 pour les essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux sur des éprouvettes avec un trou central suivi d'une expansion à 4.5%.

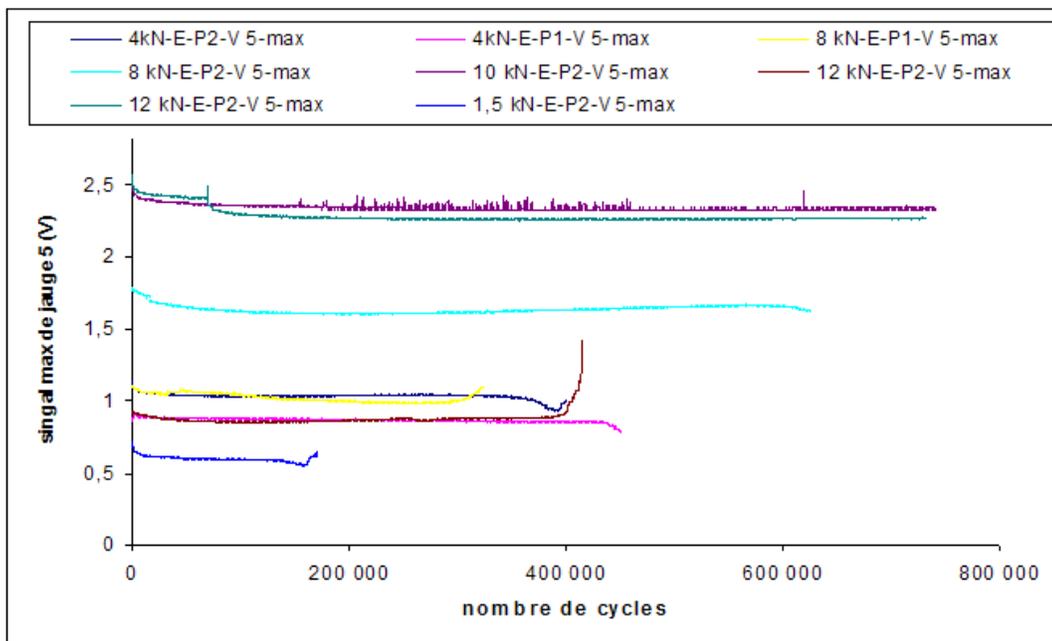


Figure 3.21 Evolution de signal de jauge 5 pour les essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux sur des éprouvettes avec un trou central suivi d'une expansion à 4.5%.

- Signal de jauge 5 et jauge 6

L'évolution de signal de la jauge 5 (figure 3.21) et de la jauge 6 pour les essais avec des trous expansés est similaire à celle décrite dans les paragraphes précédents concernant les trous sans expansion.

3.1.4 Comparaison entre les essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux sur des éprouvettes avec un trou central suivi d'une expansion à 4.5% et sans expansion.

3.1.4.1 Durée de vie en fretting fatigue

La figure 3.22 montre la durée de vie en fretting fatigue pour les essais sur des éprouvettes avec expansion à 4,5% et sans expansion. La figure, montre une évolution similaire des deux cas, et il n'y a pas de différence significative.

L'expansion du trou n'améliore pas la durée de vie sur des éprouvettes avec un trou central. Ceci est dû vraisemblablement à l'opération de polissage après expansion «opération nécessaire pour éliminer le bourrelet» qui a pour conséquence la relaxation des contraintes résiduelles.

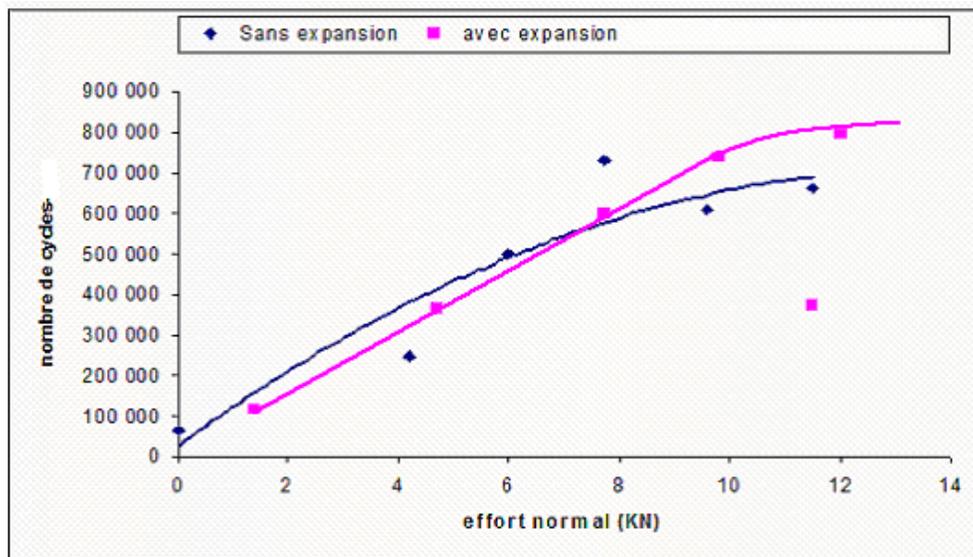


Figure 3.22. Durée de vie en fretting fatigue pour les essais sur des éprouvettes avec expansion à 4,5% et sans expansion.

3.1.4.2 Suivi de processus d'essai

Les figures 3.23-3.25 présentent l'évolution de l'effort normal sur une éprouvette avec un trou expansé (E) et sans expansion. La valeur de l'effort normal est de 4, 8, et 12kN. Pour les différents efforts normaux, les deux configurations présentent la même évolution. La différence que l'on peut tirer de ces figures est sur les valeurs initiales de l'effort normal. Pour 4 et 8 kN, la valeur initiale du cas avec expansion est supérieure au cas sans expansion, par contre pour l'effort normal de 12 kN nous constatons l'inverse.

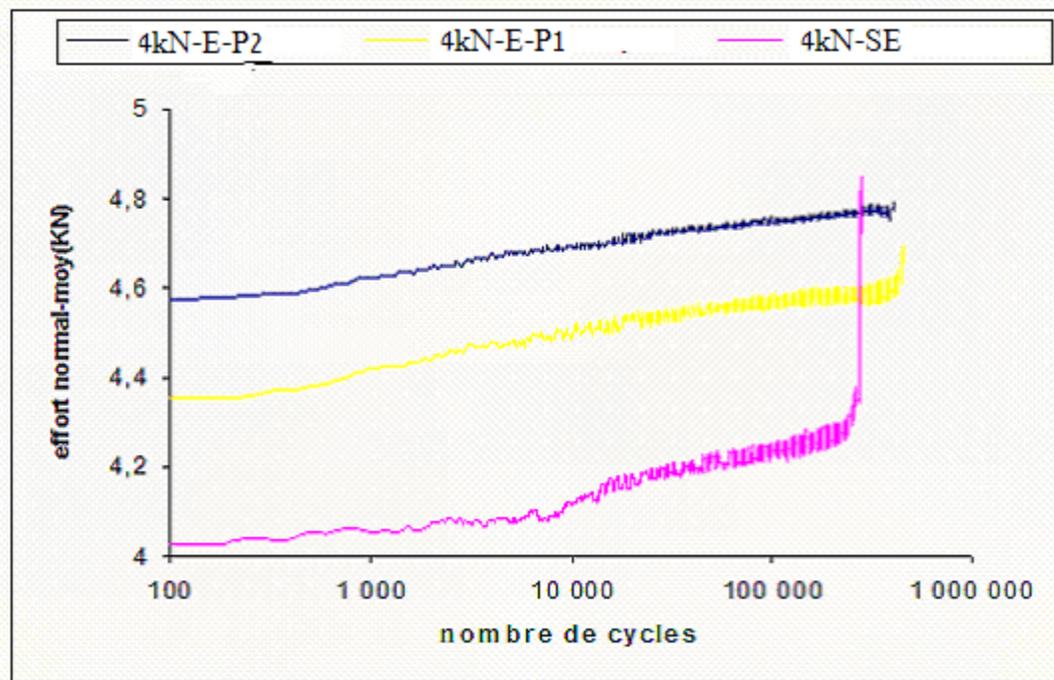


Figure 3.23 Evolution de l'effort normal pour les essais de 4kN (E : avec expansion, SE : sans expansion, P1 : polissage sur une face, P2 : polissage sur deux faces)

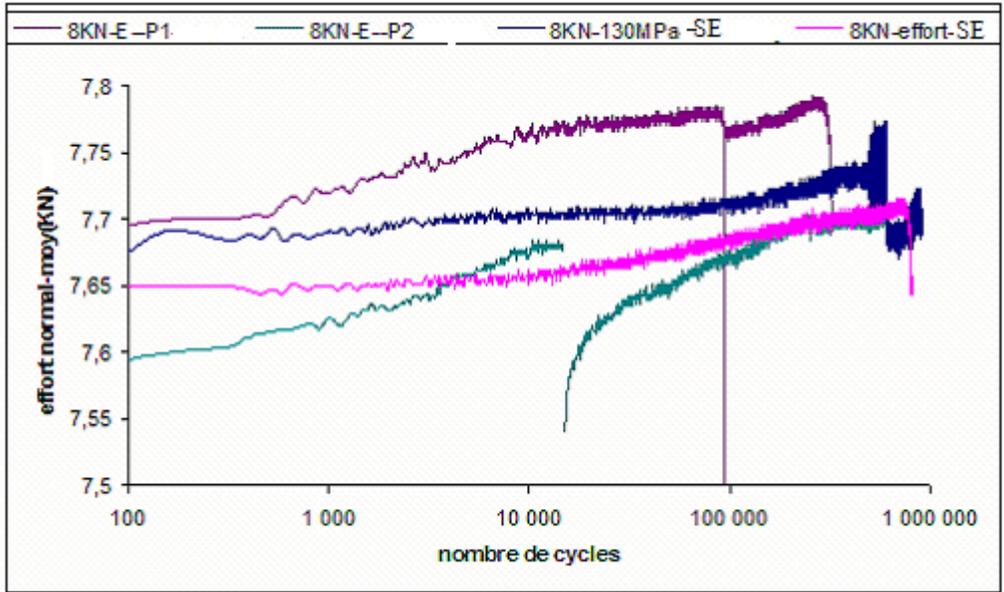


Figure 3.24 Evolution de l'effort normal pour les essais de 8kN (E : avec expansion, SE : sans expansion, P1 : polissage sur une face, P2 : polissage sur deux faces)

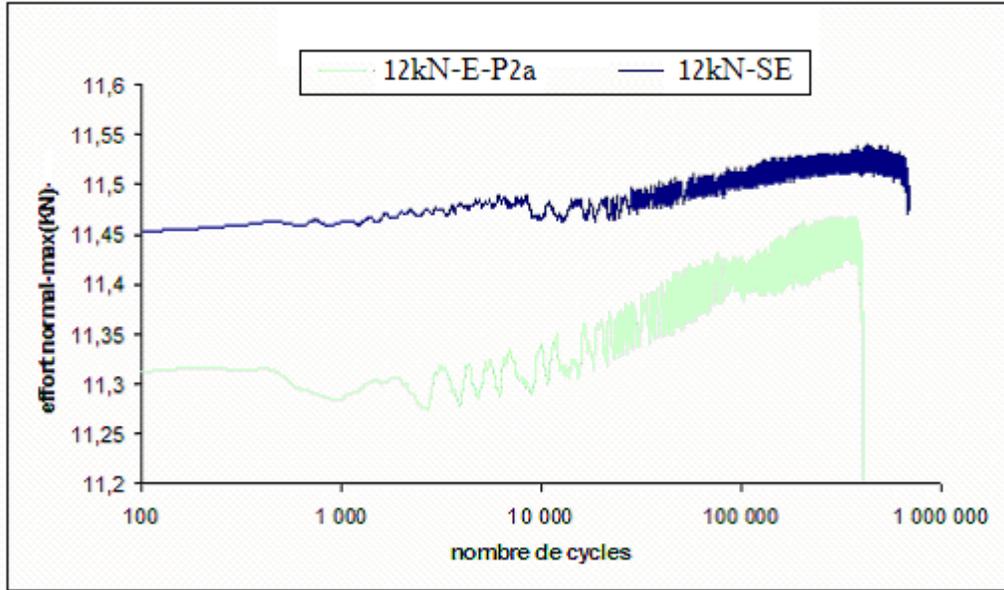


Figure 3.25. Evolution de l'effort normal pour les essais de 12kN (E : avec expansion, SE : sans expansion)

Amplitude des déformations de Jauge J1 et J2

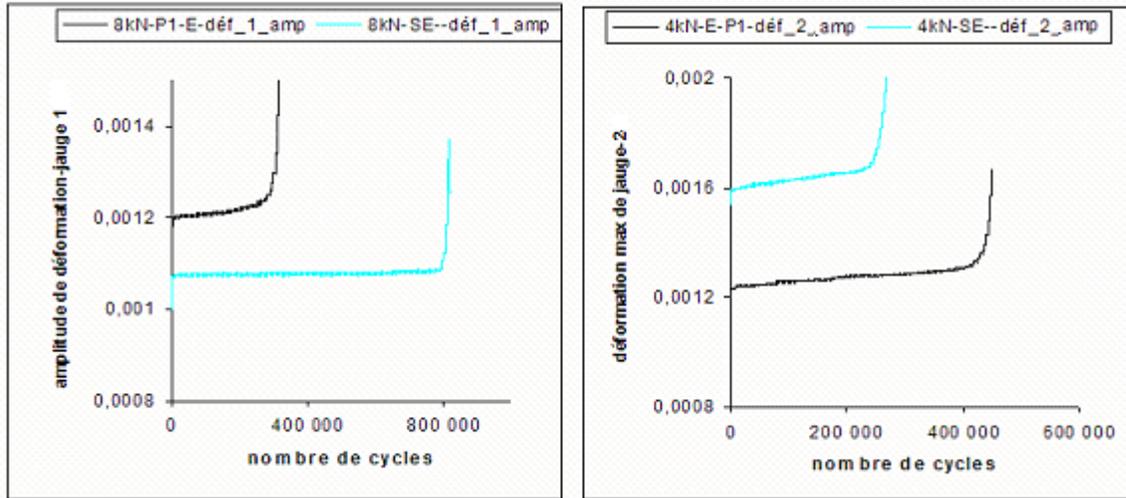


Figure 3.26 : Evolution de l'amplitude de déformation des jauges (J1 et J2) en fonction du nombre de cycles.

Sur cette figure, les deux courbes présentent les mêmes tendances, le cas sans expansion donne des durées de vie plus importantes que le cas avec expansion. (8 kN). Pour le cas du 4 kN, nous constatons un phénomène inverse.

Déformation des jauges J1 et J2

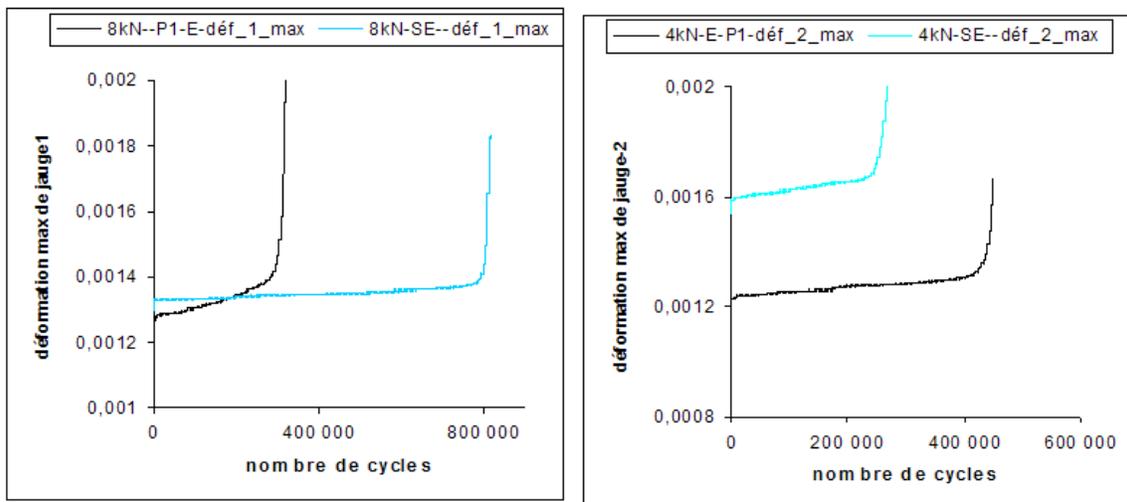


Figure 3.27 Evolution de la déformation maximale des jauges J1 et J2 en fonction de la durée de vie.

Sur cette figure 3.27, nous remarquons qu'avec un effort normal de 8 kN, la durée de vie du cas avec expansion est plus faible que celle sans expansion. L'inverse est constaté pour un effort normal de 4 kN.

Déformation des jauges J5 et J6

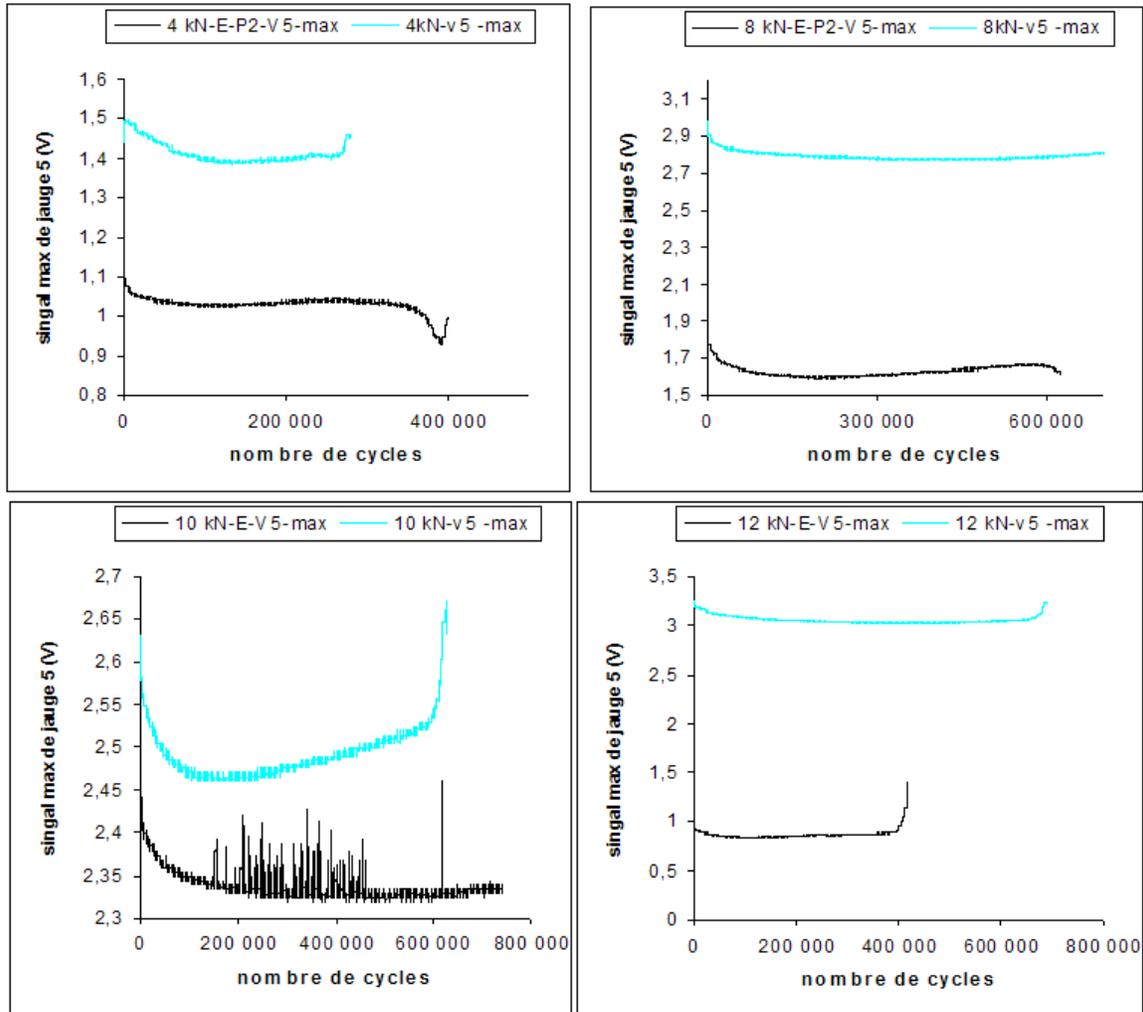


Figure 3.28 Evolution de la jauge 5

Les courbes montrant l'évolution du signal de la jauge n°5 en fonction de la durée de vie pour les différents efforts normaux sont données sur la figure précédente. Dans tout les cas de figure, le signal de la jauge 5 avec un trou sans expansion, présente des valeurs initiales plus élevées que le cas avec un trou expansé. Au niveau de la durée de vie, l'effort normal de 4 et 10 kN, présente des durées de vie supérieure pour le cas du trou

expansé par rapport à celui sans expansion. Par contre pour 8 et 12 kN, nous constatons l'effet inverse. Pour le cas de 10 kN, il n'y a pas d'amorçage de fissure avec la configuration du trou expansé

Amplitude des déformations des jauges 5 et 6 :

Avec les amplitudes de déformations nous constatons les mêmes évolutions que le signal de la jauge.

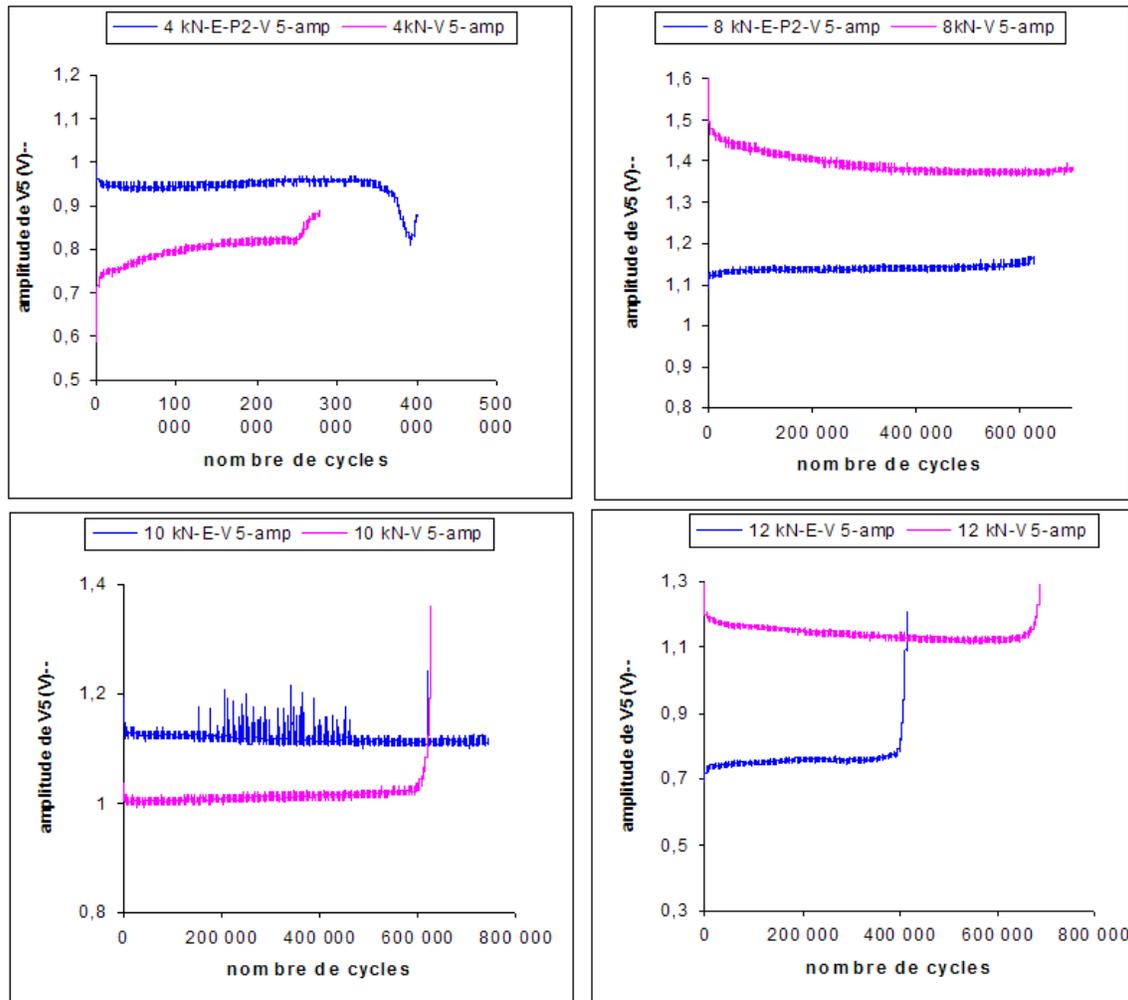


Figure 3.29 Evolution de l'amplitude de la jauge 5

3.1.5 Essais de fretting fatigue pour différents coefficients de frottement avec un trou central

3.1.5.1 Durée de vie en fretting fatigue

La durée de vie en fretting fatigue est donnée dans le tableau 3.6 et sur la figure 3.30. Dans le tableau 3.6, la durée de vie pour tous les essais de fretting fatigue est plus élevée que la durée de vie en fatigue pure. L'augmentation du coefficient de frottement de 0,06 à 0,12, provoque la chute de la durée de vie en fretting fatigue de l'ordre de 1/3. Et quant le coefficient de frottement continue d'augmenter après cette valeur jusqu'à 0.17, la durée de vie reste assez stable.

Epreuve	Contrainte maximale nominale (MPa)	Effort normal (kN)	Coefficients de frottement	Nombre de cycle à amorçage	Nombre de cycle à rupture
CS_4	145	0,00	---	107 974	
CS_3	145	6,15	0,049	1 224 000	1 277 550
CS_5	145	6,15	0,068	1 298 209	1 331 880
CS_6	145	6,15	0,117	495 590	522 808
CS_9	145	6,18	0,117	556 877	595 901
CS_7	145	6,18	0,167	403 198	521 665
CS_8	145	6,16	0,167	561 663	860 433

Tableau 3.6 Durée de vie en fretting fatigue pour les essais avec différents coefficients de frottement avec un trou central.

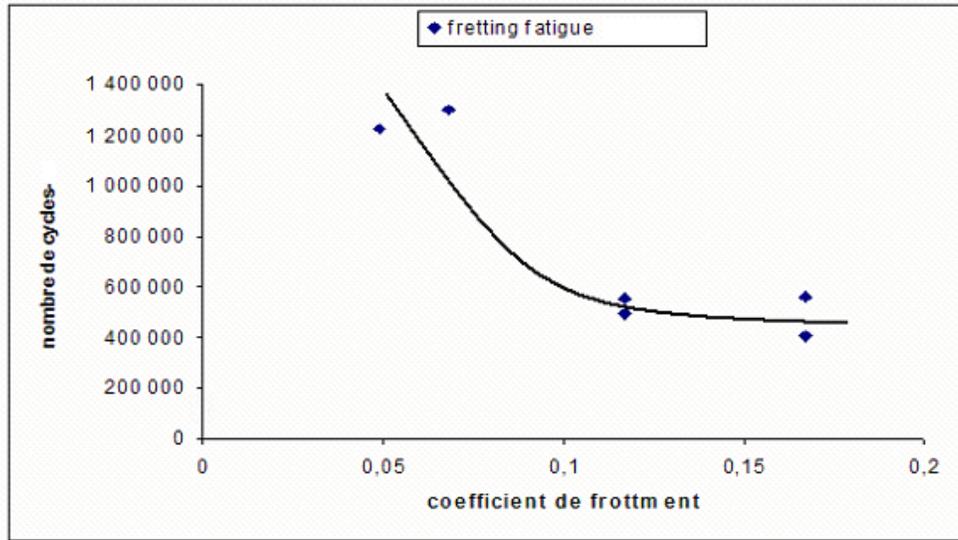


Figure 3.30 Durée de vie en fretting fatigue en fonction de coefficient de frottement.

3.1.5.2 Suivi d'essai de fretting fatigue

La figure 3.31, présente l'évolution de l'effort normal en fonction du nombre de cycles pour les différentes valeurs du coefficient de frottement. L'effort normal pour tous les essais avant début d'essai est au tour de 6.15 kN mais il dévie au début de fretting fatigue. Pour les essais avec une valeur de coefficient de frottement de 0.167, l'effort normal diminue au tour de 5.6 kN, 5.9 pour les essais avec une valeur de coefficient de frottement de 0.117, 6.1 kN pour l'essai avec une valeur de coefficient de frottement de 0.07. Après la première phase de croissance, l'effort normal de l'essai ayant une valeur de coefficient frottement plus petite est toujours plus grand, mais les tendances d'évolution pour tous les essais sont semblables.

La figure 3.32 montre l'évolution de signal de la jauge 5. Cette évolution présente la même tendance que celle de l'effort normal.

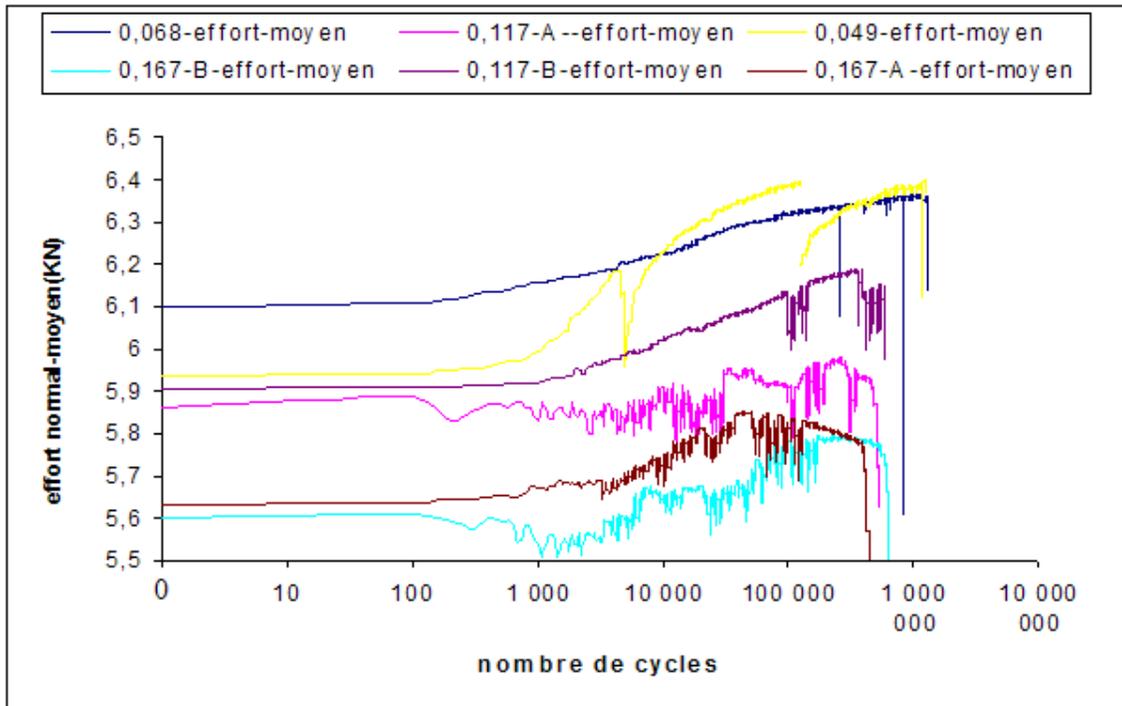


Figure 3.31 Evolution de l'effort normal pour l'essai de fretting fatigue pour différents coefficients de frottement avec un trou central.

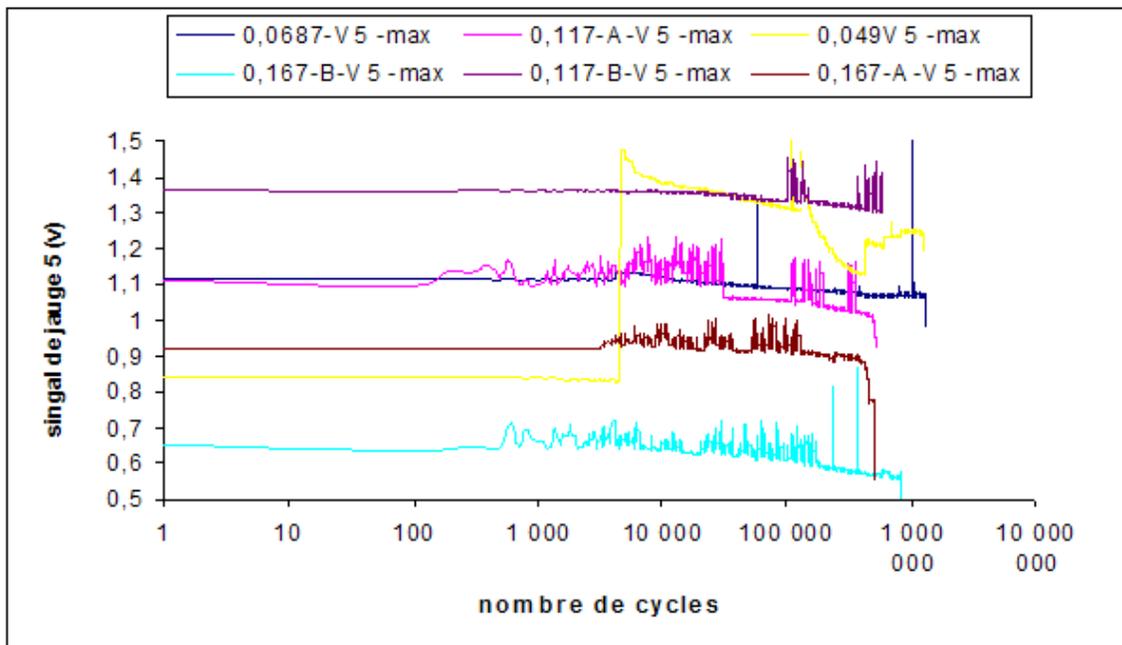


Figure 3.32 Evolution de signal de la jauge 5 pour les essais de fretting fatigue pour différents coefficients de frottement avec un trou central.

3.1.6 Essais de fretting fatigue sur des assemblages boulonnés (Alu-Acier) avec un trou expansé et sans expansion

Le tableau 3.7 présente la durée de vie des ces essais. La durée de vie de l'éprouvette 1_S (sans expansion) est proche de celui de l'essai avec rivet. La comparaison de l'essai sur éprouvette 2_E (avec expansion) et sur éprouvette 4_S (sans expansion), réalisé sous un même effort normal (16,5 kN), montre que le deuxième cas (éprouvette 4_S) présente la durée de vie la plus élevée. En prenant la configuration sans expansion, éprouvette 1_S avec un effort normal de 17.2 kN et l'éprouvette 4_S, avec un effort normal de 16.5 kN, cette dernière présente une durée de vie plus élevée. Ceci reste valable pour la configuration avec expansion.

Eprouvette	Charge moyenne (kN)	Effort normal nominal (kN)	Effort normal vrais (kN)	La durée de vie (nombre de cycles
1_S	22,5	17	17,2	2 048 811
2_E	22,5	17	16,5	1 684 513
3_E	22,5	17	15,5	2 263 621
4_S	22,5	17	16,5	3 322 073
Rivet	22,5	rivet	-----	2 092 650

Tableau 3.7 Durée de vie en fretting fatigue sur des assemblages boulonnés avec un trou expansé (E) et sans expansion (S).

Les figures 3.33 et 3.34 donnent les évolutions de l'effort normal et le signal de la jauge 5. Il est difficile de déterminer l'amorçage sur les différentes courbes. Les différents signaux des jauges enregistrés durant les essais ne permettent pas une analyse ou une interprétation précise.

La figure 3.35 présente l'évolution de déplacement du vérin

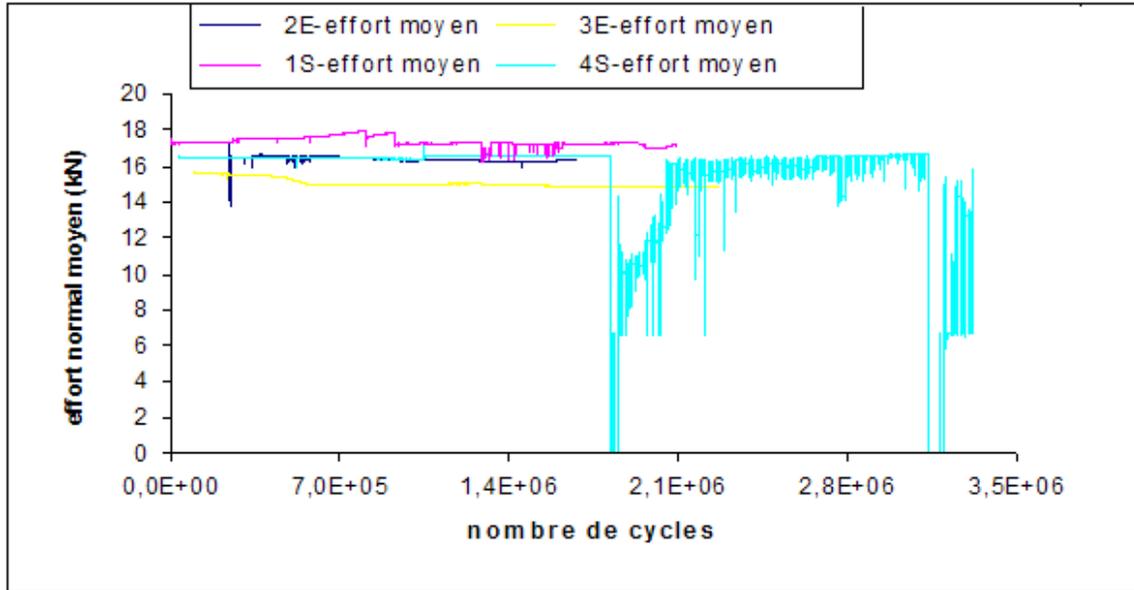


Figure 3.33 Evolution de l'effort normal pour les essais de fretting fatigue sur des assemblages boulonnés avec un trou expansé (E) et sans expansion (S).

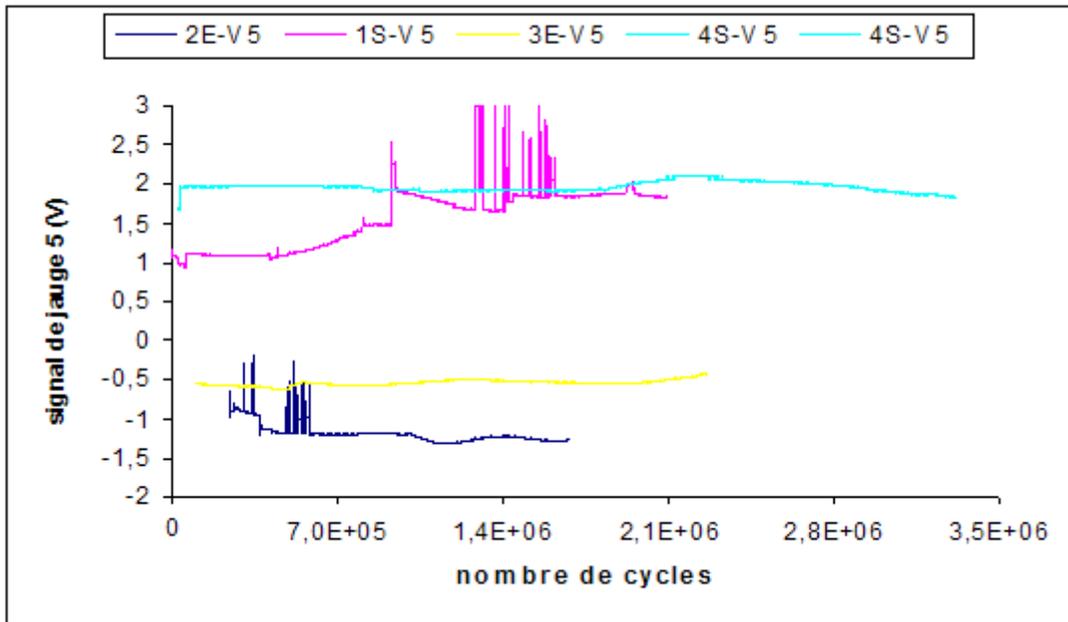


Figure 3.34 Evolution de signal de la jauge 5 pour les essais de fretting fatigue sur des assemblages boulonnés avec un trou expansé (E) et sans expansion (S).

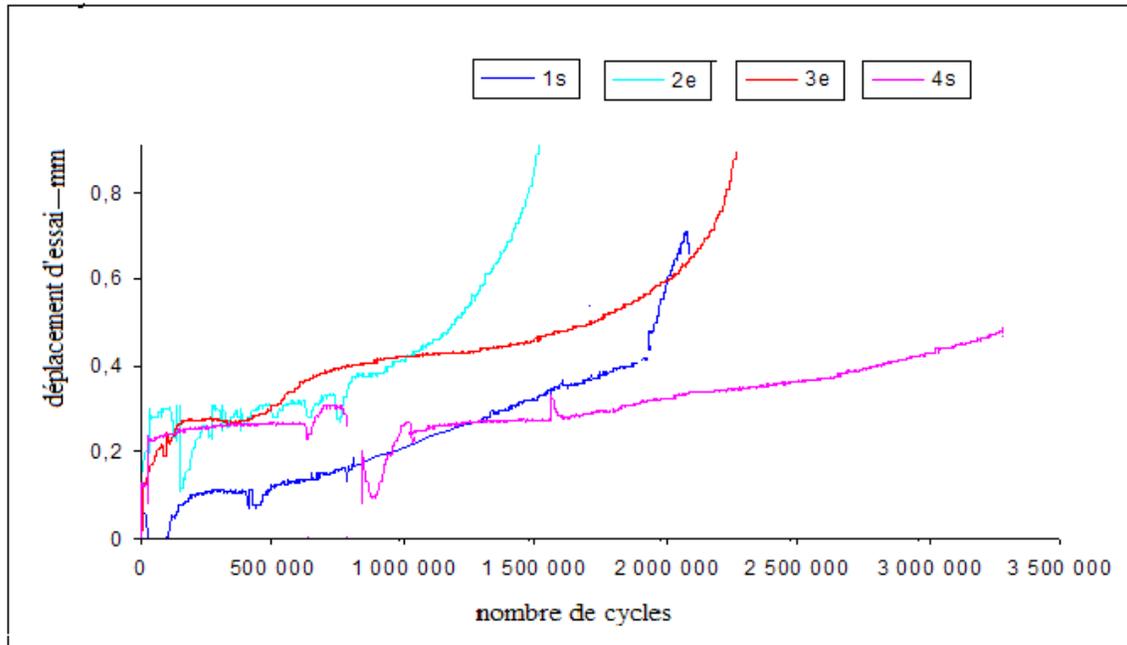


Figure 3.35 Evolution du déplacement du vérin pour les essais de fretting fatigue sur des assemblages boulonnés avec un trou expansé (E) et sans expansion (S).

3.2 Analyses micrographiques

Dans cette partie nous présentons les analyses micrographiques réalisées sur les différentes éprouvettes. Un microscope électronique à balayage « JEOL JSM-6480 » a été utilisé en mode électrons secondaires afin d’observer les fissures, les endommagements dûs au contact, ainsi que pour analyser les surfaces de rupture des éprouvettes.

Par ces analyses, nous recherchons les sites d’amorçage, la propagation de fissure dans les différentes configurations d’essais, et aussi comprendre les mécanismes de dégradation du matériau par fatigue et par fretting fatigue.

3.2.1 Analyse micrographique sur les éprouvettes avec un trou central pour les essais de fatigue

La figure 3.36 montre les fissures sur les éprouvettes d’essai de fatigue avec les chargements de 100MPa à 200 MPa. On observe que pour chaque éprouvette, il existe

une ou deux fissures au bord du trou. Après amorçage, les fissures se propagent selon la direction perpendiculaire à l'axe de la sollicitation cyclique. Toutes les fissures que nous montrons ici sont avec une longueur d'environ 10 mm. Sur cette figure, nous remarquons que l'ouverture de la fissure augmente avec l'augmentation de la charge.

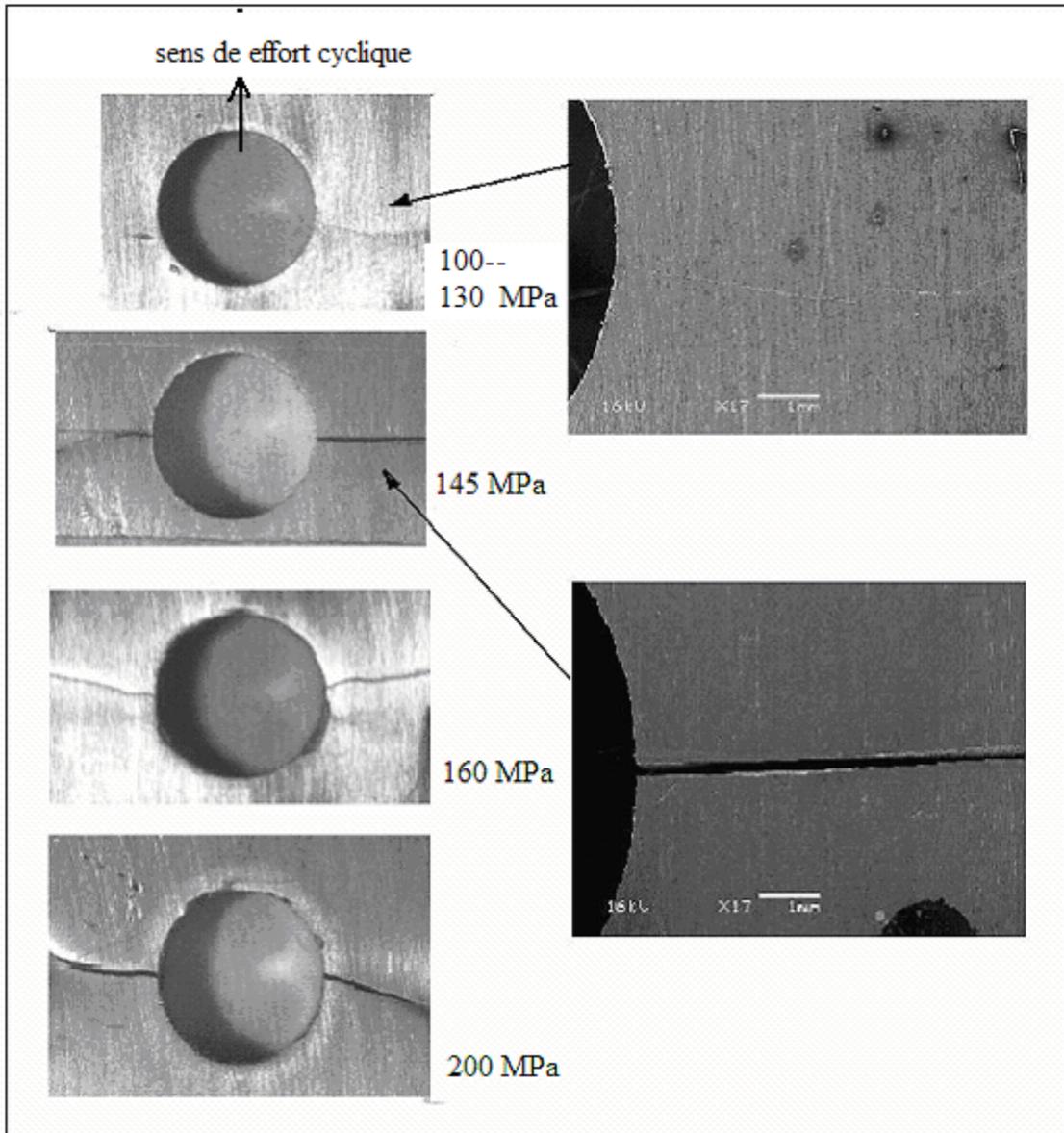


Figure. 3.36. Macrographie des fissures de fatigue pour différents chargements.

La figure 3.37 a) présente schématiquement le plan de propagation de la fissure à

droite et à gauche du trou (faciès). Les analyses qui seront développées par la suite sont réalisées uniquement sur la fissure à droite du trou central comme le montre la figure 3.37 b) : faciès de propagation de la fissure à droite du trou central de l'éprouvette CF_2 (160 MPa).

Sur la photo b), on note qu'il y a deux sites d'amorçage de la fissure qui se trouvent dans le voisinage de la surface et du trou central comme l'indique les figures 3.37 c) et d). Les diamètres des sites d'amorçage sont d'environ 1 mm. Après amorçage, la fissure se propage dans le ligament dans la direction perpendiculaire à l'axe de la sollicitation.

Les analyses sur les autres échantillons des essais de 100, 145 et 200 MPa montrent les mêmes sites d'amorçage.

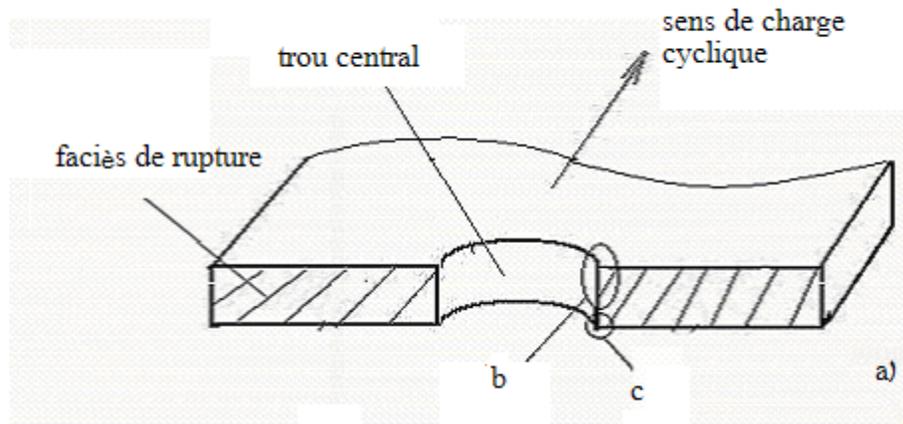


Figure 3.37-a) Schéma de plan de propagation de la fissure à droite et à gauche du trou de l'éprouvette CF_2 (160 MPa)

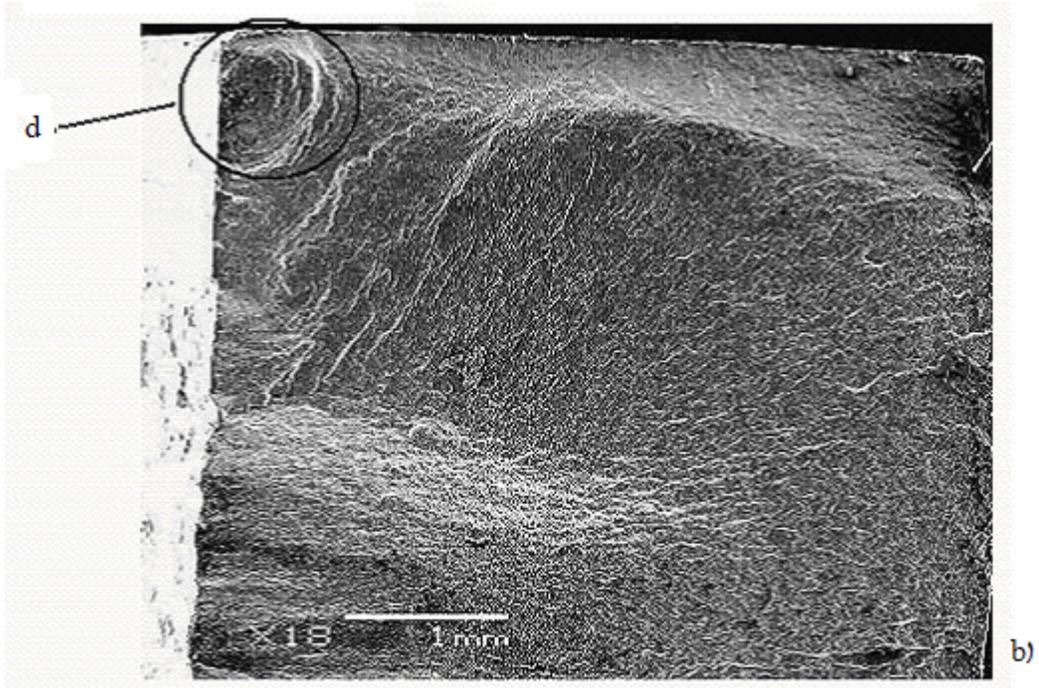


Figure 3.37-b) Faciès de la propagation de la fissure CF_2 (160 MPa)

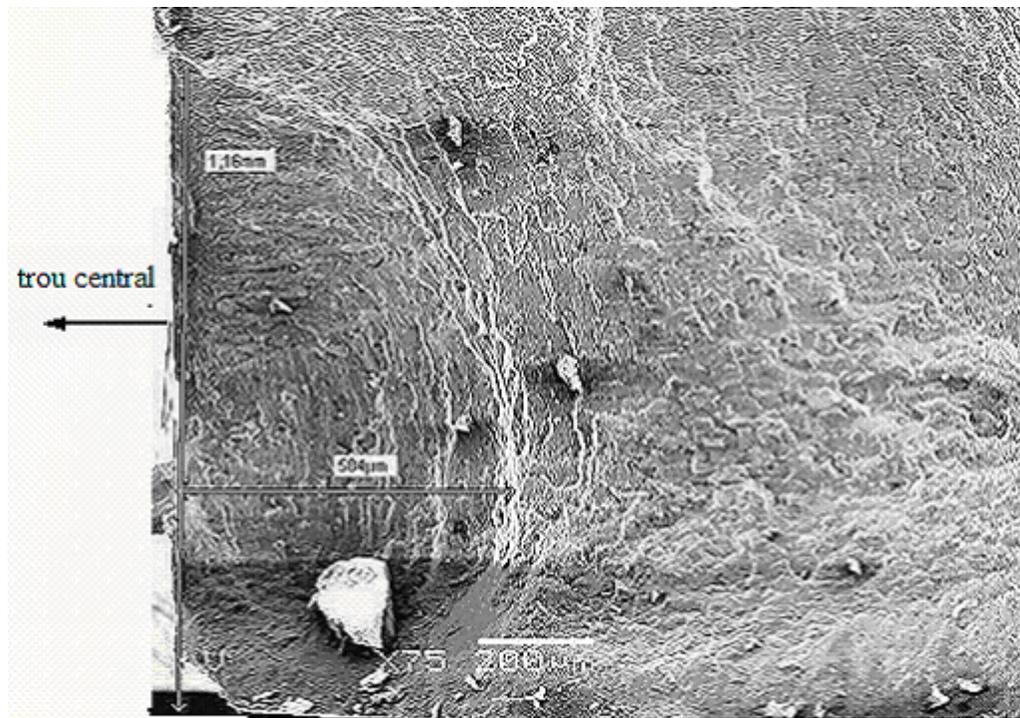


Figure 3.37 -c) Site d'amorçage localisé sur de l'éprouvette CF_2 (160 MPa)

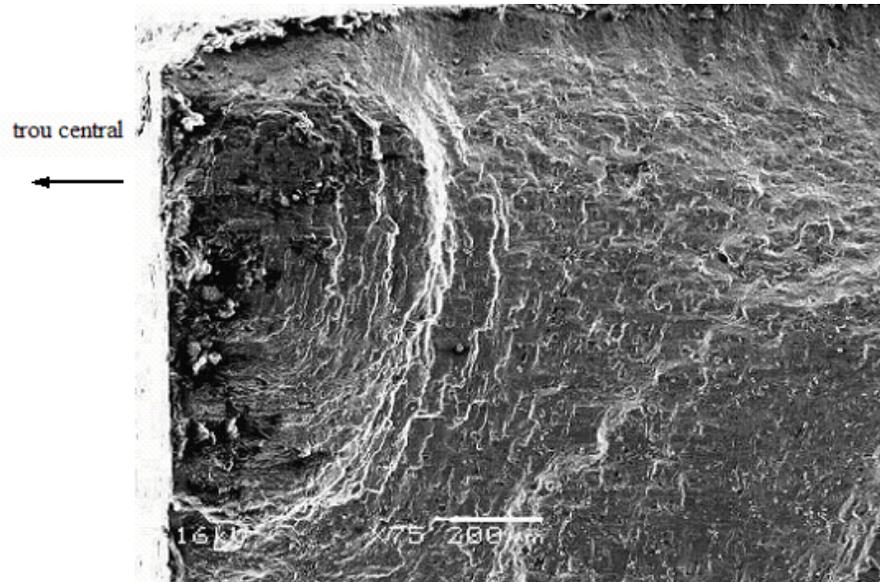


Figure 3.37-d) Site d'amorçage sur une autre position sur de l'éprouvette CF_2 (160 MPa)

La figure 3.38 montre une fissure secondaire qui se situe sur la surface intérieure du trou central au voisinage du plan de propagation de la fissure principale.

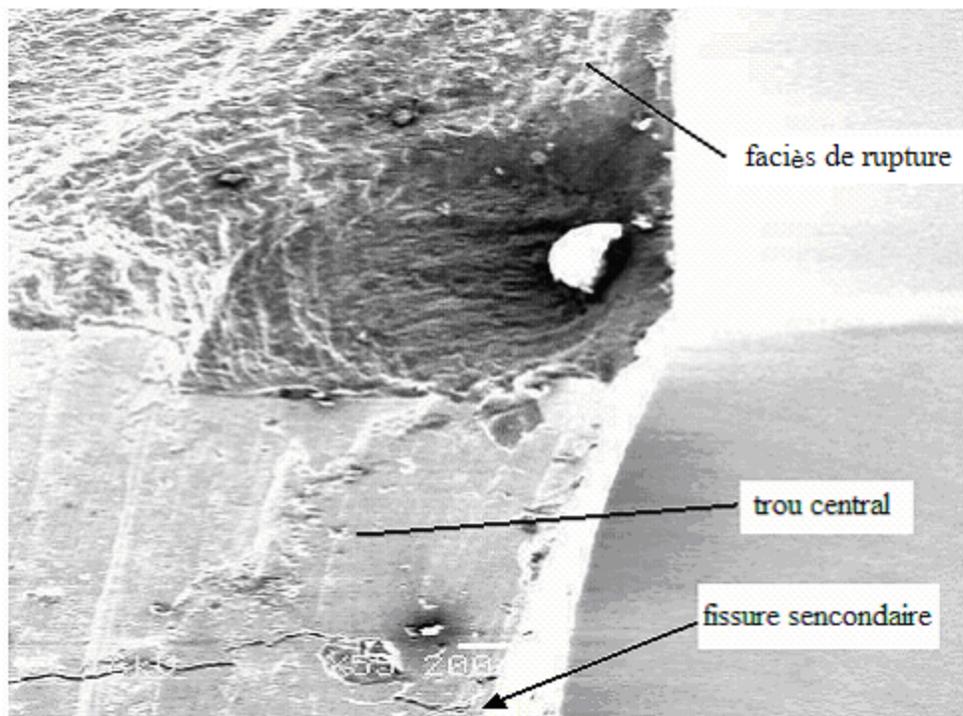


Figure 3.38 Présence de fissure secondaire.

3.2.2 Analyse micrographique sur des éprouvettes avec un trou central pour les essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux.

3.2.2.1 Endommagement sur la surface du contact par fretting fatigue.

- **Distributions de marques sur une éprouvette**

Pendant les essais de fretting fatigue, le frottement entre l'éprouvette et le contre-corps introduit des endommagements sur la surface du contact de l'éprouvette (marque de frottement).

La figure 3.39 nous présente l'aspect de la surface de l'éprouvette C_1 avec un effort normal de 8 kN après sollicitation en fatigue. La zone de contact est une zone de forme circulaire (rondelle) comme la surface du contact du contre-corps (voir 2.4.3).

La largeur de cette zone est d'environ 5 mm comme l'indique la photo (f) de la figure 3.39. Les marques de frottement se situent sur toute la zone de contact avec une répartition non régulière et présentent des caractéristiques suivantes :

La distribution de marques sur toute la zone est décalée. Dans la partie qui se trouve au voisinage de la ligne centrale de l'éprouvette (axe de symétrie longitudinal dans le sens de la largeur) (eg : photo f), la densité des marques est plus petite, et leur dimensions sont aussi petites. Par contre dans la ligne centrale de l'éprouvette (axe de symétrie vertical dans le sens de la hauteur) que ce soit dans la zone supérieure ou inférieure, la densité des marques augmente considérablement (eg : photo a, b, c, d, et e). Cette densité de distribution est en relation avec le déplacement relatif entre les surfaces de contact qui est introduit par la charge cyclique. Dans l'essai de fretting fatigue, le déplacement relatif sur la ligne centrale de l'éprouvette est nul, et le frottement entre deux surfaces de contact sur cette zone est très faible. Ce déplacement relatif est maximal sur la frontière du contact entre les deux surfaces. Ce déplacement passe d'une valeur quasiment nulle sur l'axe de symétrie longitudinal à une valeur maximale sur l'axe de symétrie vertical au niveau de la frontière de la zone du contact.

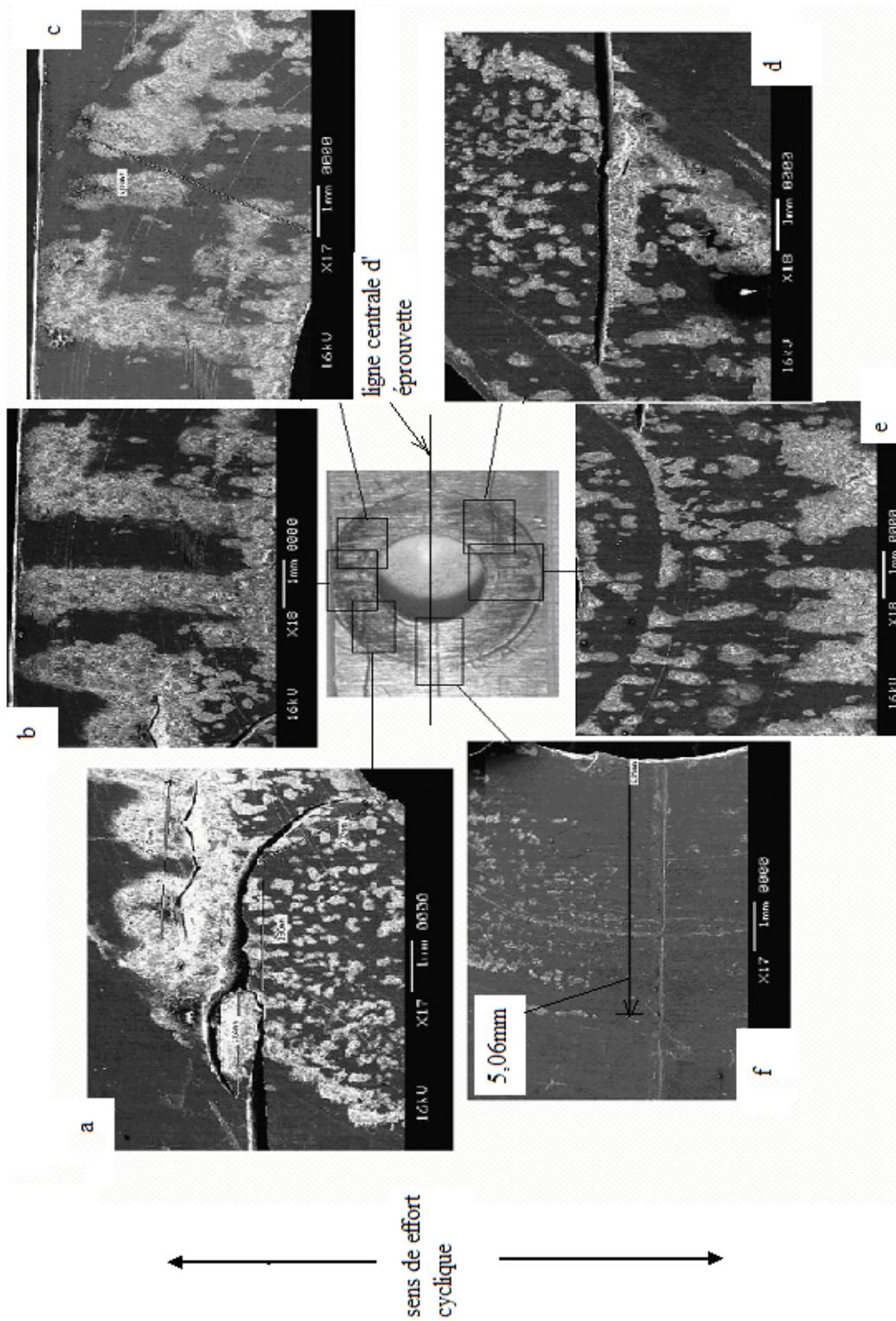


Figure 3.39 Distribution des marques de fretting fatigue sur la surface de l'éprouvette C_1 (8kN).

Les essais de fretting fatigue pour différentes valeurs de l'effort normal, induisent différents niveaux de l'endommagement sur la surface du contact. Les figures 3.40 à 3.43, présentent les surfaces de contact de l'éprouvette pour les essais de 4, 6, 10, et 12kN. Nous notons que plus la valeur de l'effort normal est élevée, plus l'endommagement est marqué sur la surface du contact. Ceci est dû du fait que:

1) Avec l'augmentation de l'effort normal, la densité des marques de frottement dans la même zone de la surface du contact augmente. Dans l'essai avec un effort normal de 4kN, les marques de frottement se trouvent principalement à la frontière du contact. Dans l'essai de 6kN, quelques marques se trouvent à l'intérieure de la zone de contact et beaucoup plus sur la frontière. Pour les essais de 8kN, 10kN, et 12kN, les marques occupent presque toute la surface du contact (dessus et dessous du trou central).

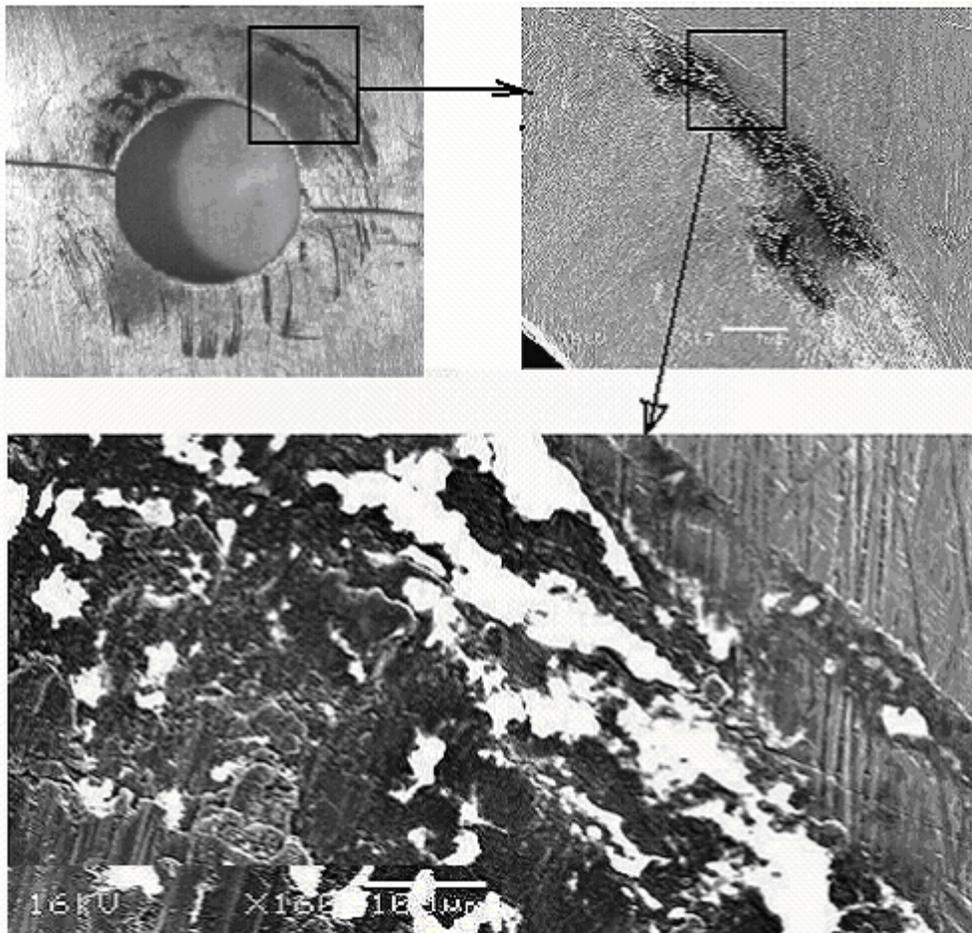


Figure 3.40 Marque de frottement pour l'essai de fretting fatigue sur un effort normal de 4 kN (C_7).

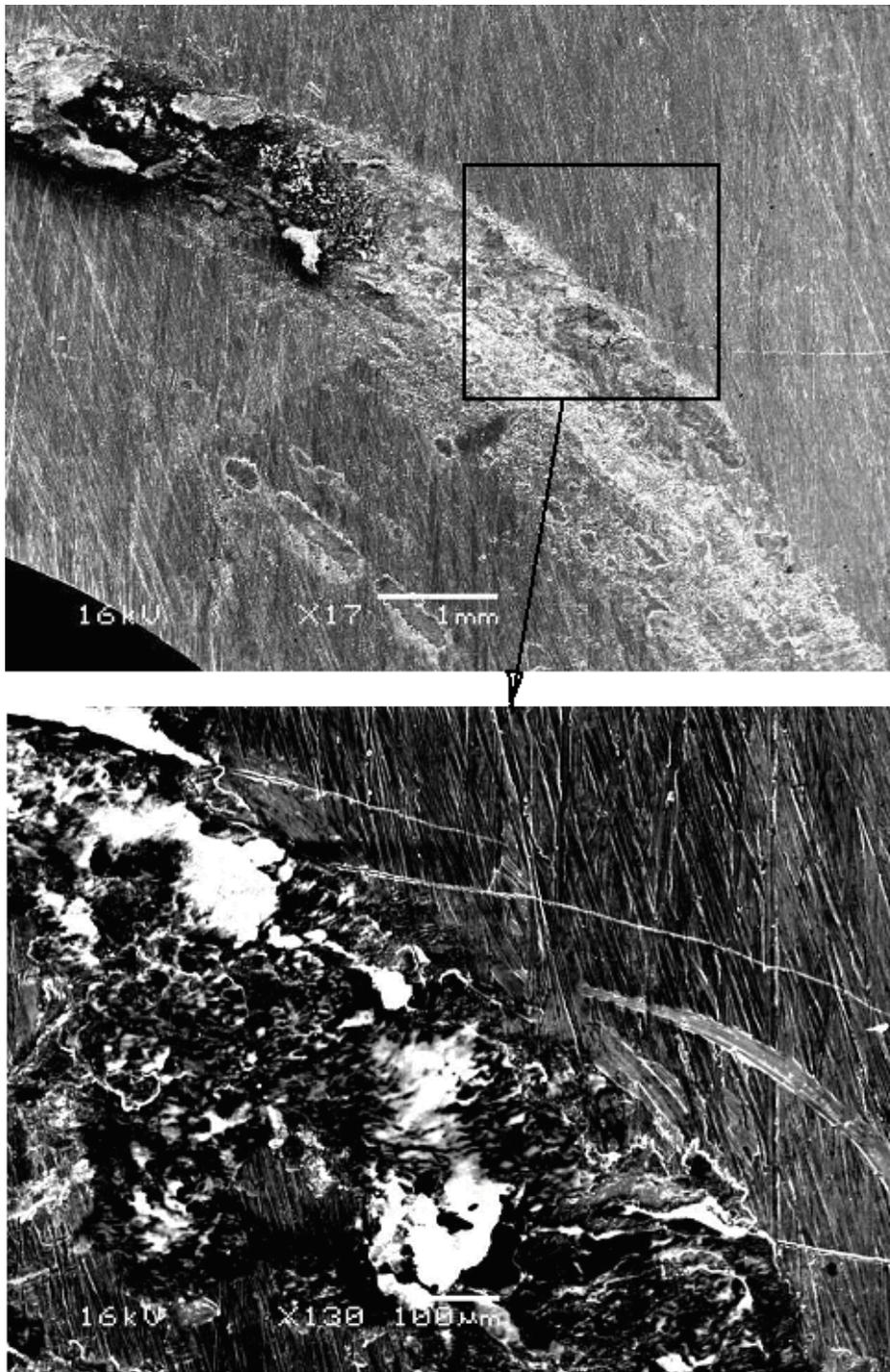


Figure 3.41 Marque de frottement pour l'essai de fretting fatigue sur un effort normal de 6 kN (C_6).

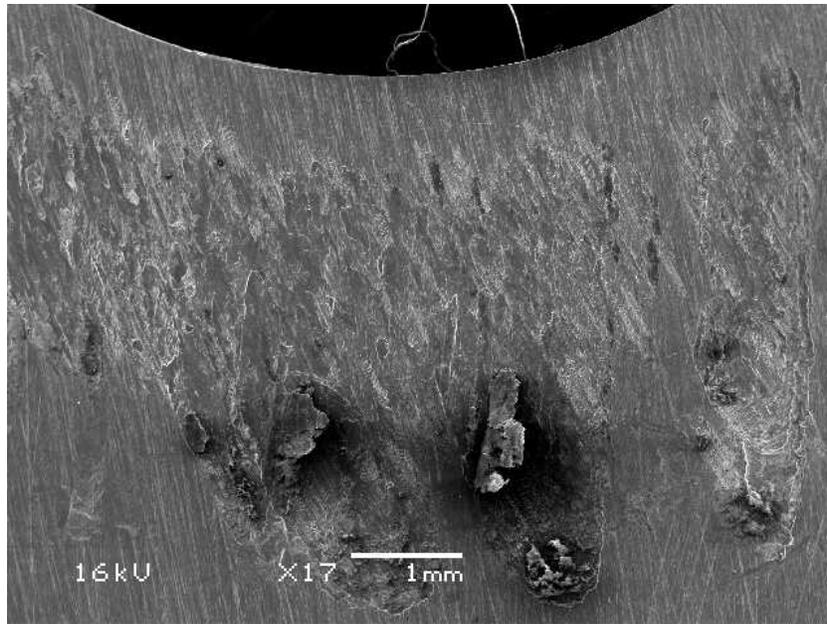


Figure 3.42 Marque de frottement pour l'essai de fretting fatigue sur un effort normal de 10 kN (C_16).

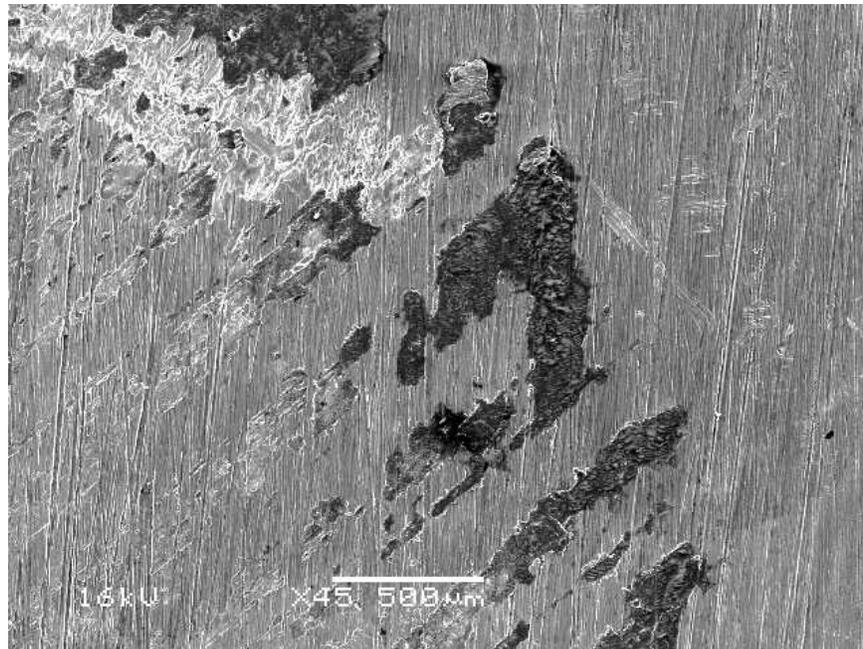


Figure 3.43 Marque de frottement pour l'essai de fretting fatigue sur un effort normal de 12 kN (C_8).

3.2.2.2 Aspect des fissures

La figure 3.44 présente la propagation de la fissure pour l'essai de fatigue avec un effort normal nul (0kN), il y a deux fissures sur la surface de l'éprouvette de chaque côté du trou central avec amorçage au bord du trou.

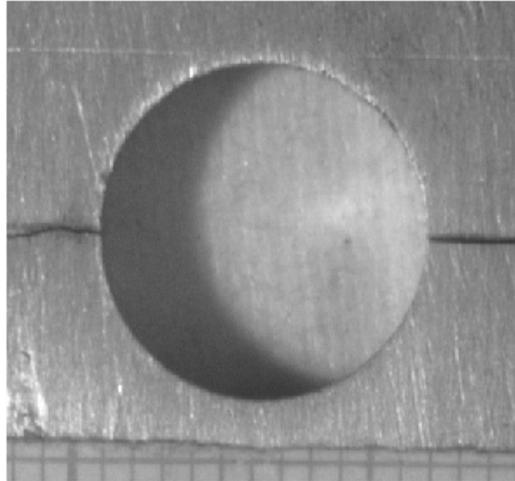


Figure 3.44 Aspect de la fissuration pour l'essai de fatigue (0kN de l'effort normal)

Pour les essais de fretting fatigue pour une valeur de l'effort normal de 4kN, nous avons 1 fissure principale de chaque côté du trou qui débouche sur celui-ci (fissure 1 et 2 sur la figure 3.45, site d'amorçage non identifié). Après analyse micrographique nous avons remarqué que sur la partie à droite du trou central, la présence de 2 fissures secondaires situées plus haut que la fissure principale (fissure 3 et 4 sur la figure). Ces deux fissures secondaires se trouvent au voisinage de la frontière de la zone de contact.

La figure 3.46 présente le faciès de rupture de la fissure 1(principale). Notons qu'il apparaît beaucoup de micro fissures sur le faciès. La longueur de la fissure est d'environ 150 μm et les fissures sont perpendiculaires à la direction de la charge cyclique et parallèle avec la surface du contact. Ceux sont des micro fissures de fatigue.

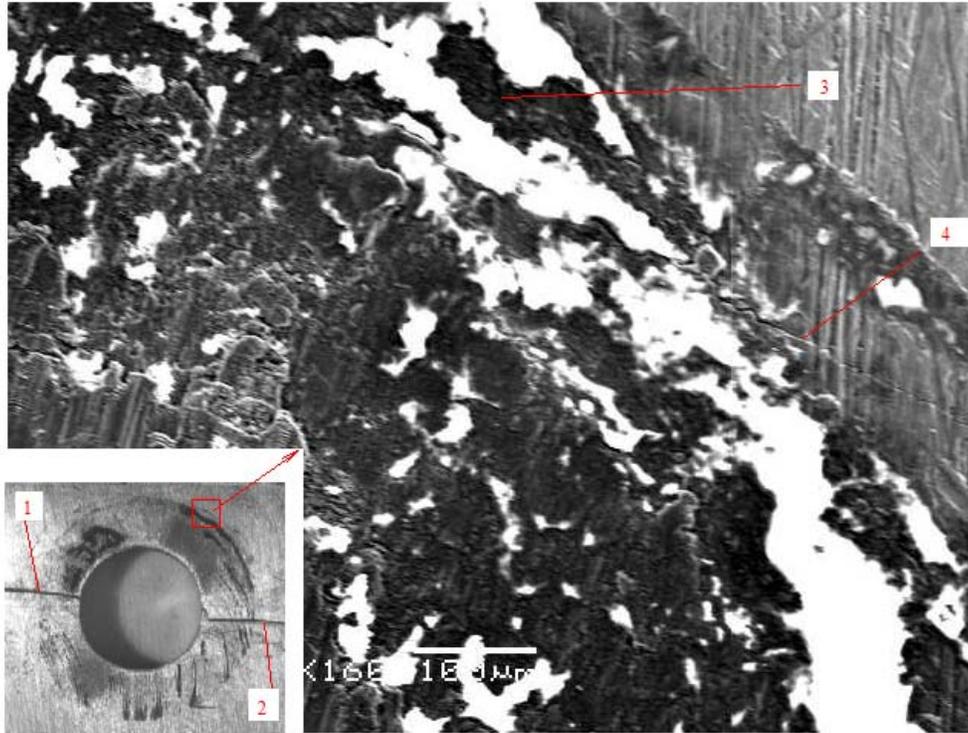


Figure 3.45 Aspect de la fissuration pour l'essai de fatigue (4kN de l'effort normal)

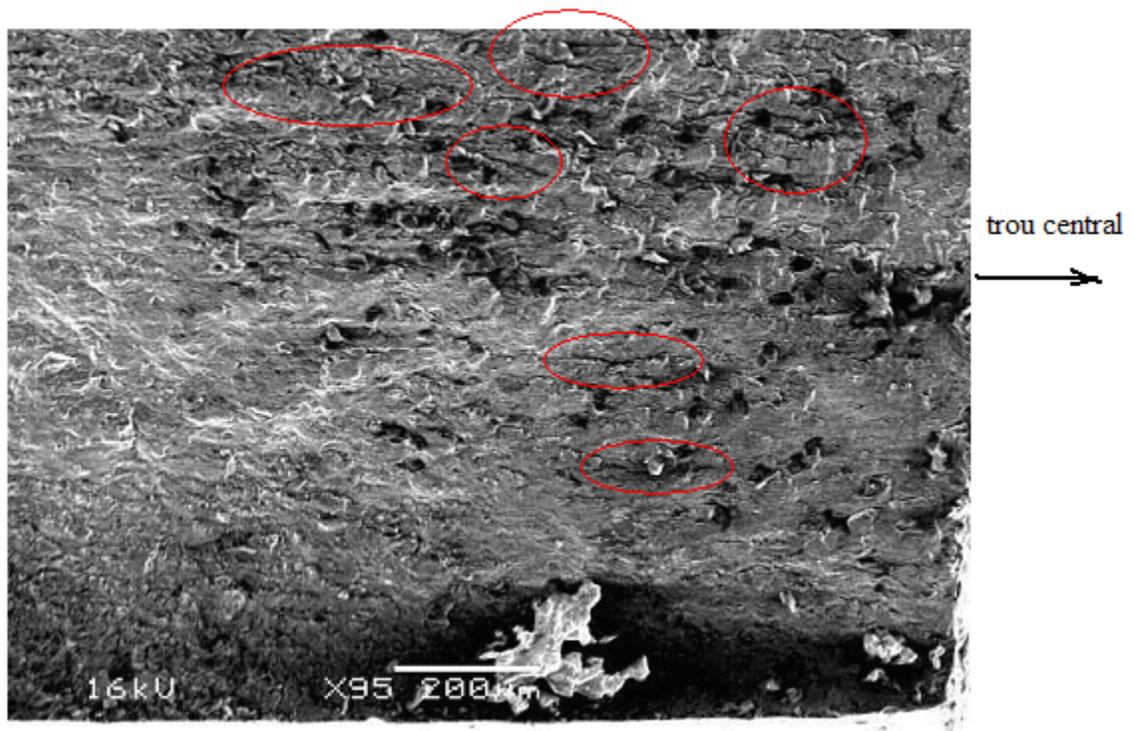


Figure 3.46 Microfissures pour l'essai de fretting fatigue de 4kN.

Pour l'essai de 6kN (figure 3.47), nous remarquons l'absence de la fissure principale située à gauche du trou, il n'y a qu'une seule fissure principale (Fissure 1). Cette fissure ne débouche pas sur le trou, elle est localisée sur la frontière de la zone de contact. L'amorçage est aussi localisé sur la frontière de la zone de contact. Par ailleurs, au voisinage du site d'amorçage de la fissure principale, il existe deux fissures secondaires (fissure 2 et 3).

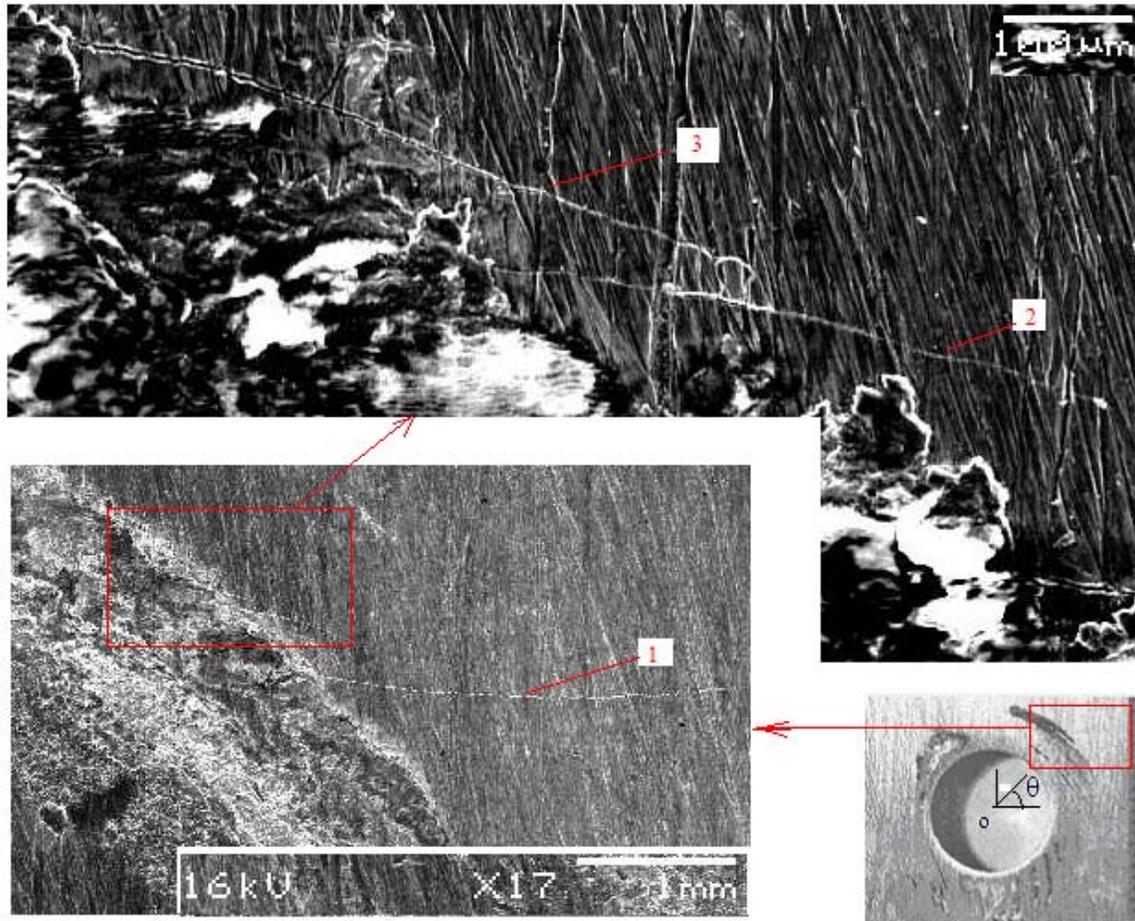


Figure 3.47 Aspect de la fissuration pour l'essai de fatigue (6kN de l'effort normal)

L'aspect de la fissure pour les essais de 8 kN est représenté sur la figure 3.48. Les sites d'amorçage sont toujours à la frontière de la zone de contact et se trouvent sur les deux côtés du trou central. L'amorçage des fissures principales (F1 et F2 sur la figure) et secondaire (F3) est décalé et est situé sur un axe faisant un angle avec l'axe de symétrie du trou. Sur le faciès de fissure (F1), on trouve plusieurs sites d'amorçage (S1, S2, S3 et

S4). La plus grande nucléation se trouve à la frontière du contact.

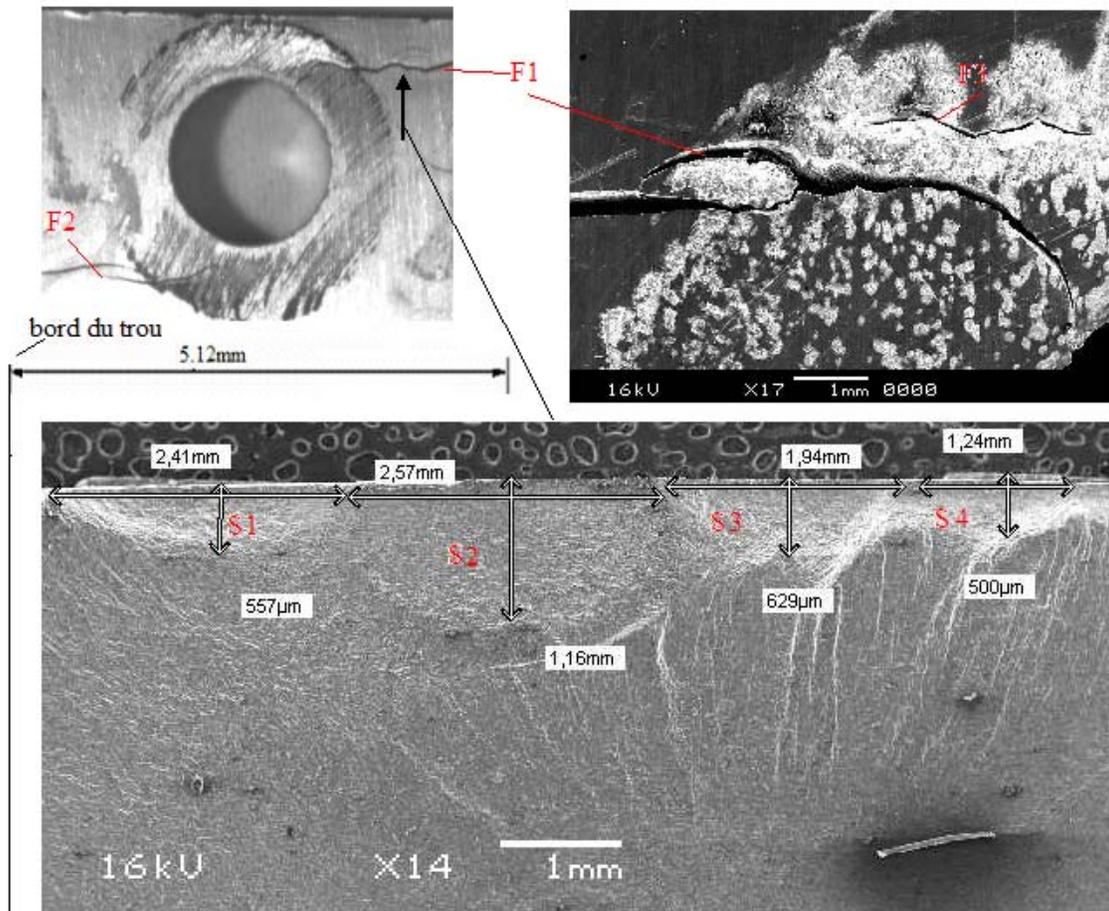


Figure 3.48 Aspect de la fissuration pour l'essai de fatigue (8kN de l'effort normal)

La figure 3.49 montre la fissure principale pour l'essai de fretting fatigue pour un effort normal de 8kN et la contrainte maximale cyclique de 130MPa. L'amorçage se trouve à la frontière du contact. On remarque que le site d'amorçage correspond à une grande marque de frottement.

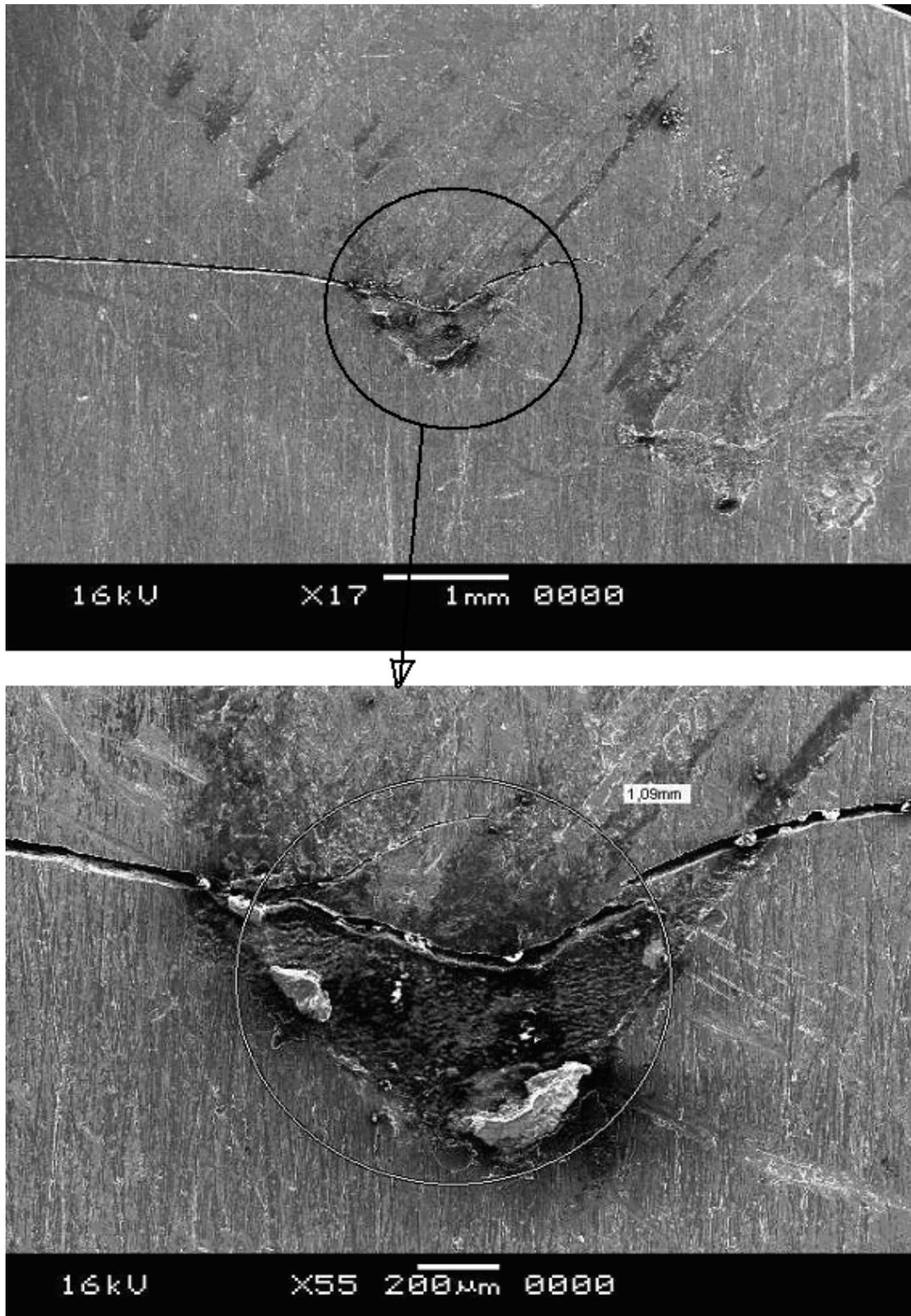


Figure 3.49 Site d'amorçage de la fissure principale pour l'essai de fretting fatigue pour un effort normal de 8kN et une contrainte maximale cyclique de 130MPa.

La figure 3.50 montre les fissures principales pour l'essai avec un effort normal de 10kN. Les fissures débouchent sur le trou et sont situées dans la direction de 40° et 55° (voir figure 3.54). Sur le faciès de rupture de la fissure (2), on remarque que le site d'amorçage est à la frontière du contact (figure 3.51). Ce site d'amorçage présente un aspect noir à cause de frottement. Par ailleurs, sur le faciès de rupture de la fissure (1), on trouve de traces de glissement comme le montre la figure 3.52.

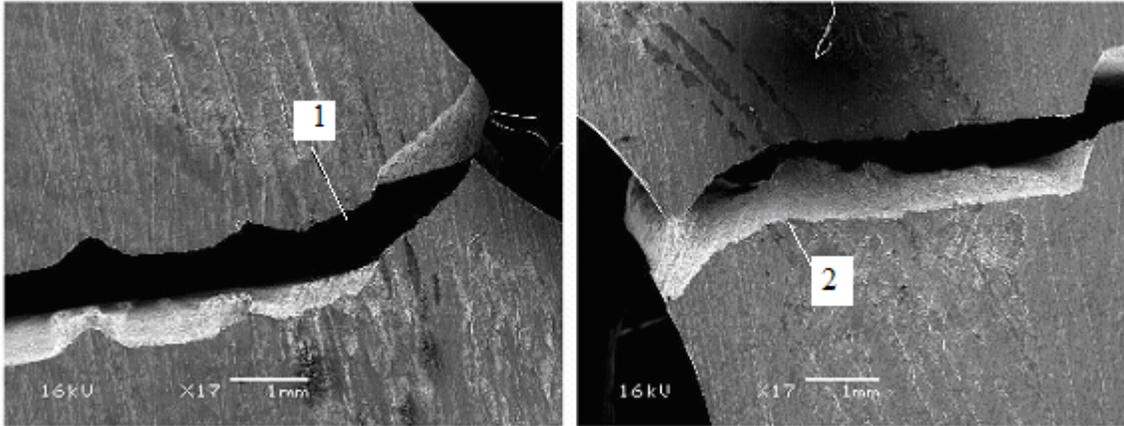


Figure 3.50 Aspect de la fissuration pour l'essai de fatigue (10kN de l'effort normal)

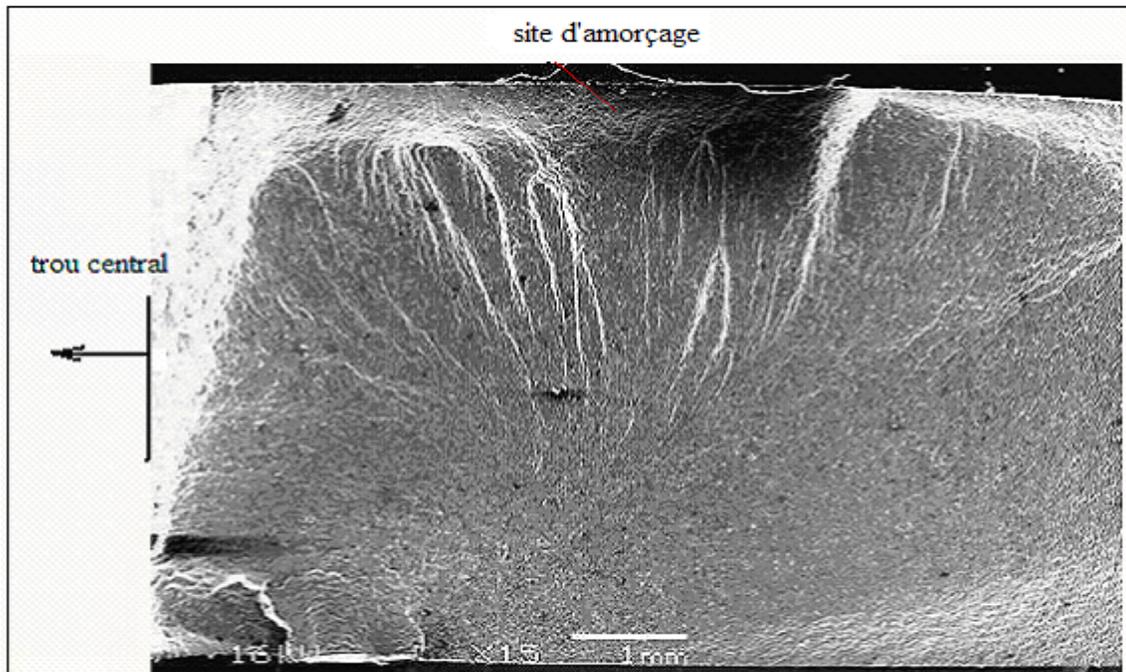


Figure 3.51 Site d'amorçage de fissure (2) pour l'essai de 10kN.

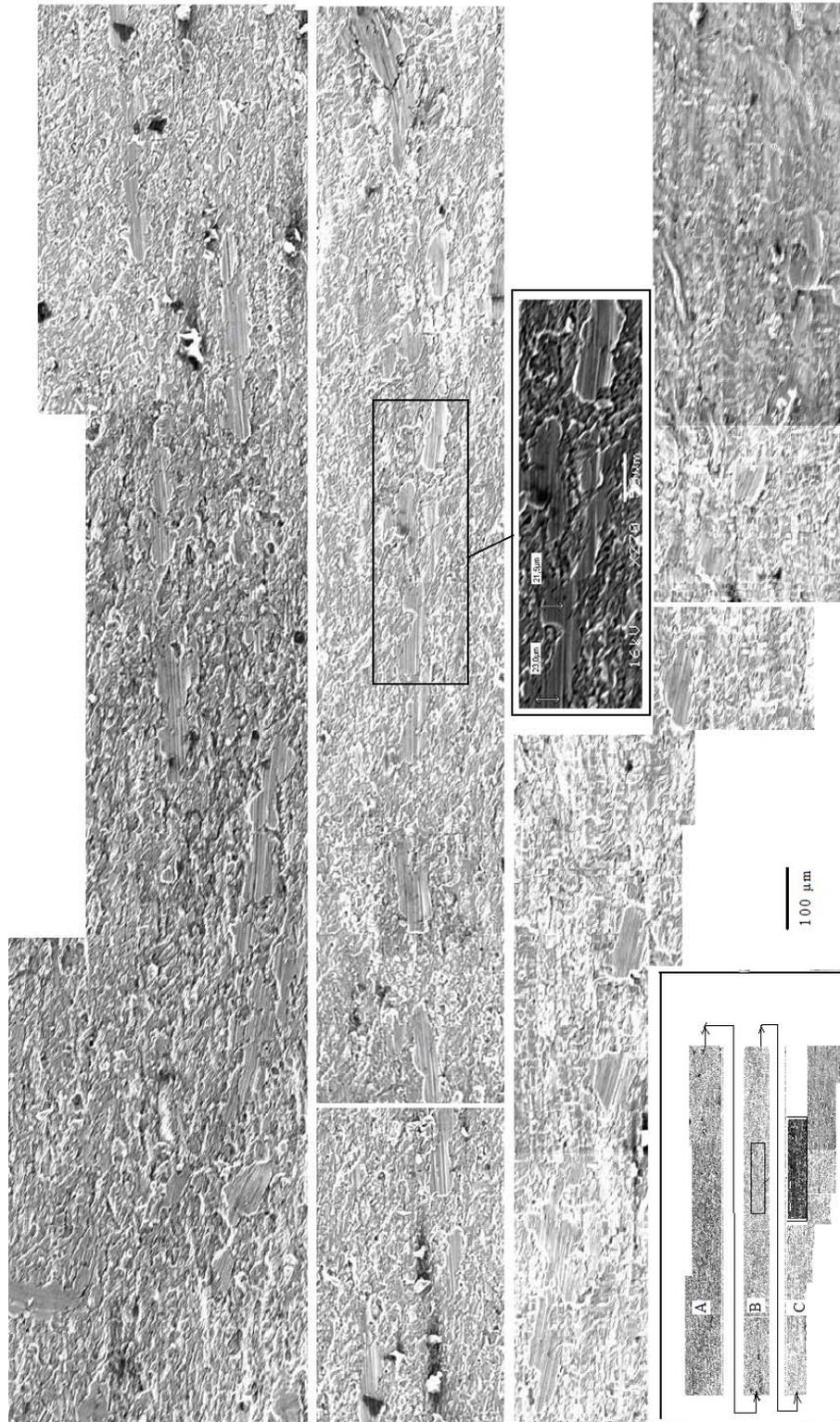


Figure 3.52 Trace de glissement sur le faciès de rupture de la fissure (1) pour l'essai de fretting fatigue de 10kN.

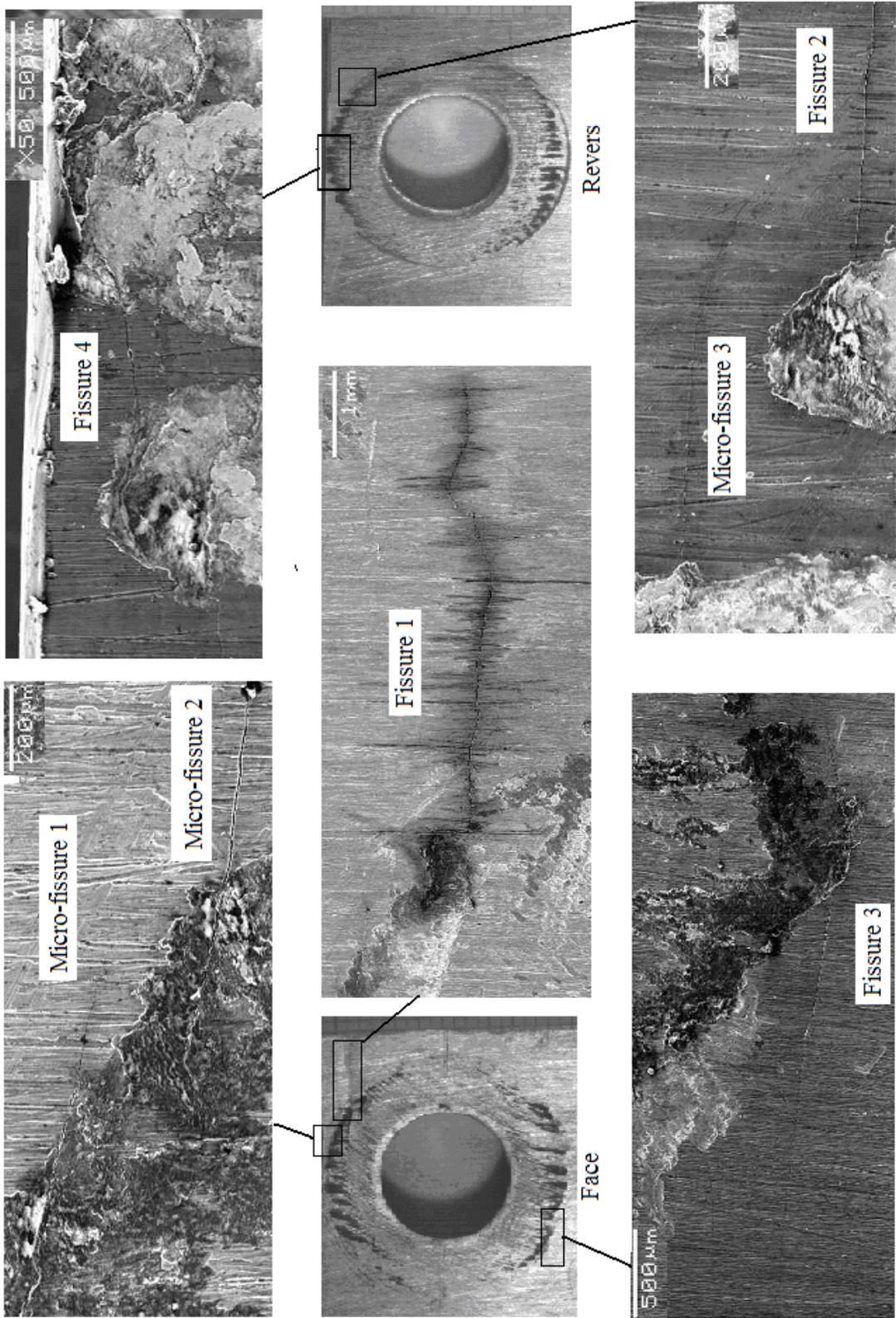


Figure 3.53. Aspect de fissuration de l'essai de 12kN (C_8).

Pour l'essai avec un effort normal de 12kN, il y a 4 fissures principales sur la surface de l'éprouvette. Elles s'amorcent à la frontière de la zone du contact. Ces fissures ne débouchent pas et ne s'amorcent pas du bord du trou (figure 3.53).

Le tableau 3.8 donne les valeurs de degrés de l'angle (θ) entre la direction du site d'amorçage et l'axe (y) ou (-y) comme l'indique la figure. Notons que le degré (θ) des sites d'amorçage à la frontière du contact sont toujours entre 40-60°.

Essai	Fissure1	Fissure2	Fissure3	Fissure4	Moyen F
0kN	0B	2B			
4kN	10	10	40F	40F	40F
6kN	45F	45F	45F		45F
8kN	40F	40F	55F		45F
10kN	40F	55F			47,5F
12kN	50F	62F	55F	45F	53F

Tableau 3.8 Angle (θ°) pour les fissures de fretting fatigue pour différents efforts normalux (B : amorce au bord du trou, F : amorce à la frontière du contact).

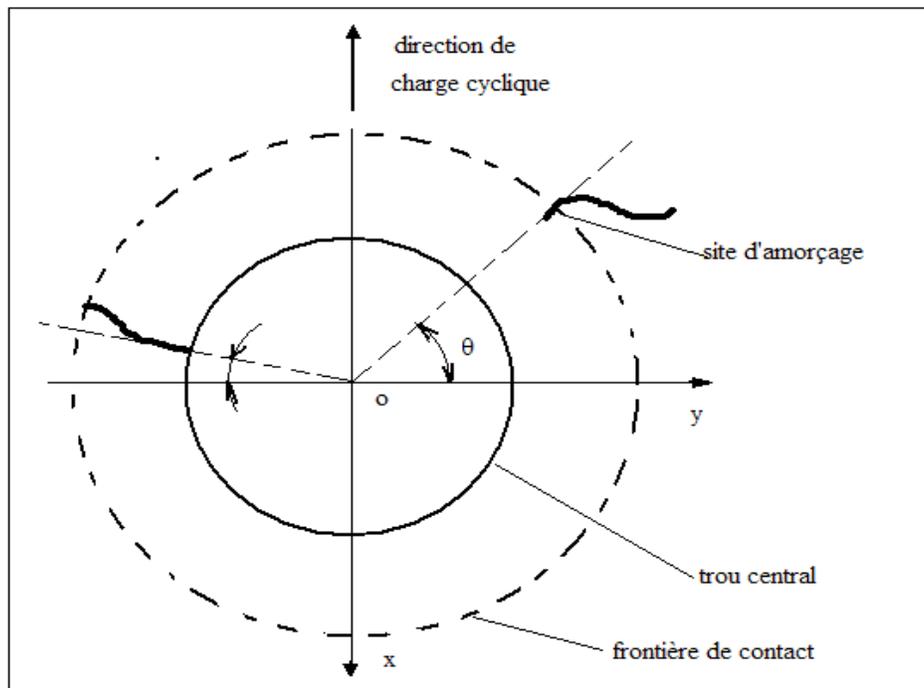


Figure 3.54 Géométrie de angle (θ) pour les fissures de fretting fatigue.

3.2.3 Analyse micrographique sur les éprouvettes avec un trou central suivi d'une expansion à 4.5% et des essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux

3.2.3.1 Endommagement sur la surface du contact par fretting fatigue.

L'endommagement sur la surface du contact pour l'essai avec expansion suivi d'un polissage est très différent par rapport à l'essai sans expansion. Il existe aussi de grande différence entre l'essai avec polissage sur une surface et l'essai avec polissage sur deux faces après expansion du trou. On présente en dessous l'endommagement sur la surface du contact.

- **Essais avec l'éprouvette avec le polissage sur deux faces (P2) après expansion par rapport aux essais sans expansion**

La figure 3.55 présente les endommagements sur la surface du contact pour l'essai sans expansion et l'essai avec expansion et polissage sur deux faces (8kN). Pour le cas de l'expansion suivie d'un polissage sur les deux faces, la face d'entrée présente la même largeur de bande de marque de frottement que la face sans expansion (environ 5 mm). La densité de la distribution des marques sur la surface du contact est plus petite et moins uniforme. On observe des marques à la frontière de la zone de contact et à l'intérieur de celle ci.

Pour la face de sortie, la largeur de bande de marque de frottement est d'environ 1,5 mm. Cette bande de marque de frottement est localisée proche du trou central. On ne trouve pas de marques ou traces de contact en dehors de cette bande. Il apparaît que la surface du contact pour la face de sortie a fortement diminuée, mais la densité et la profondeur des marques de frottement ont augmenté. Ceci est dû au fait que le polissage n'élimine pas complètement les bourrelets et le contact alors est limité à la zone de bourrelets.

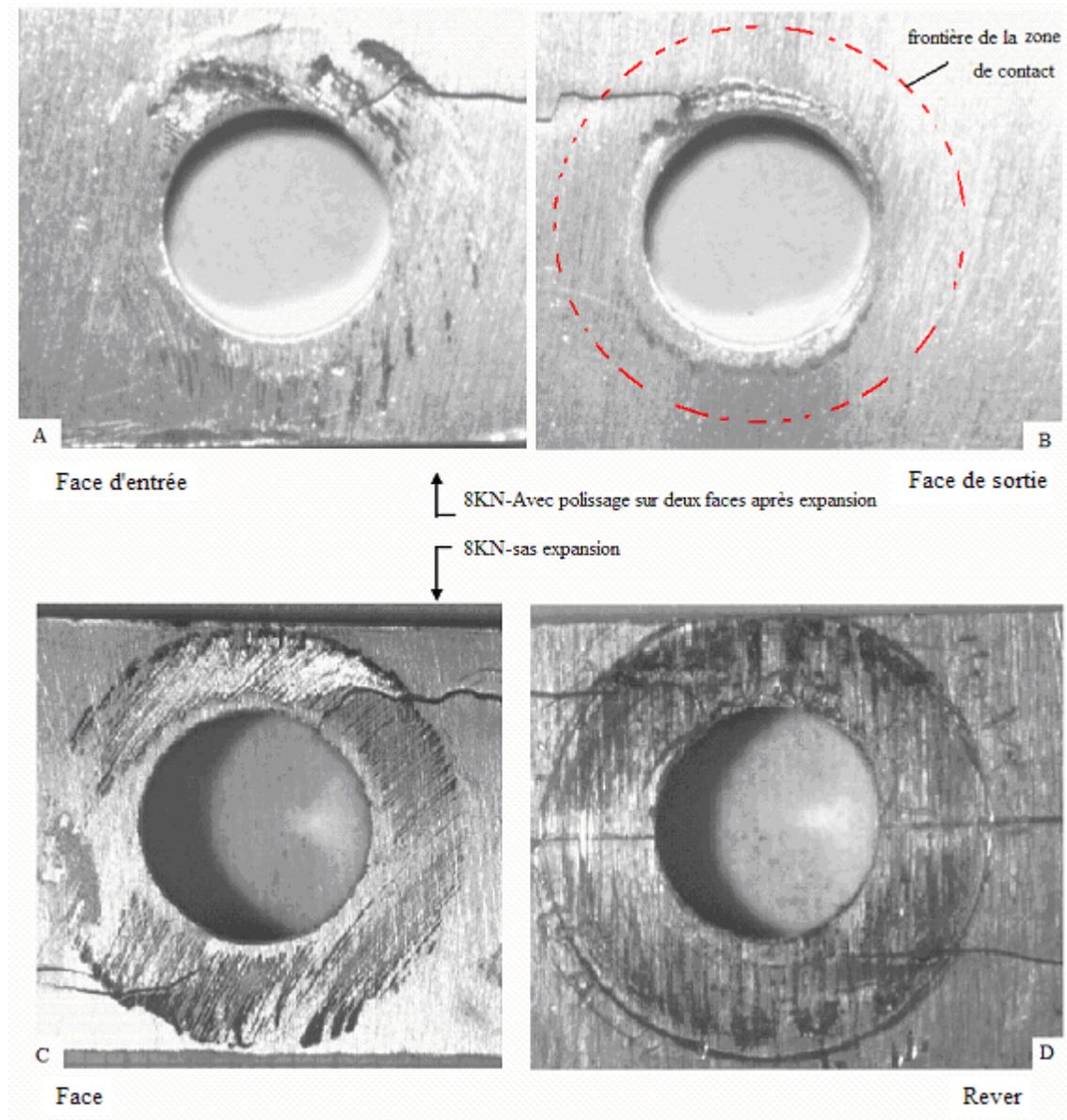


Figure 3.55 La comparaison des endommagements sur la surface du contact entre l'essai sans expansion et avec expansion suivi d'un polissage sur deux faces (8kN).

- **Essais sur éprouvettes polies sur la face de sortie (P1) après expansion et polies sur deux faces (P2)**

Sur la figure 3.56 on remarque que sur la face de sortie, l'essai avec un polissage sur la face de sortie présente le même endommagement que celui avec un polissage sur les

deux faces. La bande de marque de frottement a diminué et reste toujours au voisinage du trou central. Sur la face d'entrée, la bande de marque de frottement a aussi diminué. En fait, la bande contient trois ou quatre grandes marques au voisinage du trou. Pour le cas d'un polissage sur la face de sortie, les zones de contact pour les deux faces diminuent.

Les différences observées sont dues vraisemblablement à l'opération de polissage qui dans certains cas peut modifier la planéité de la surface.

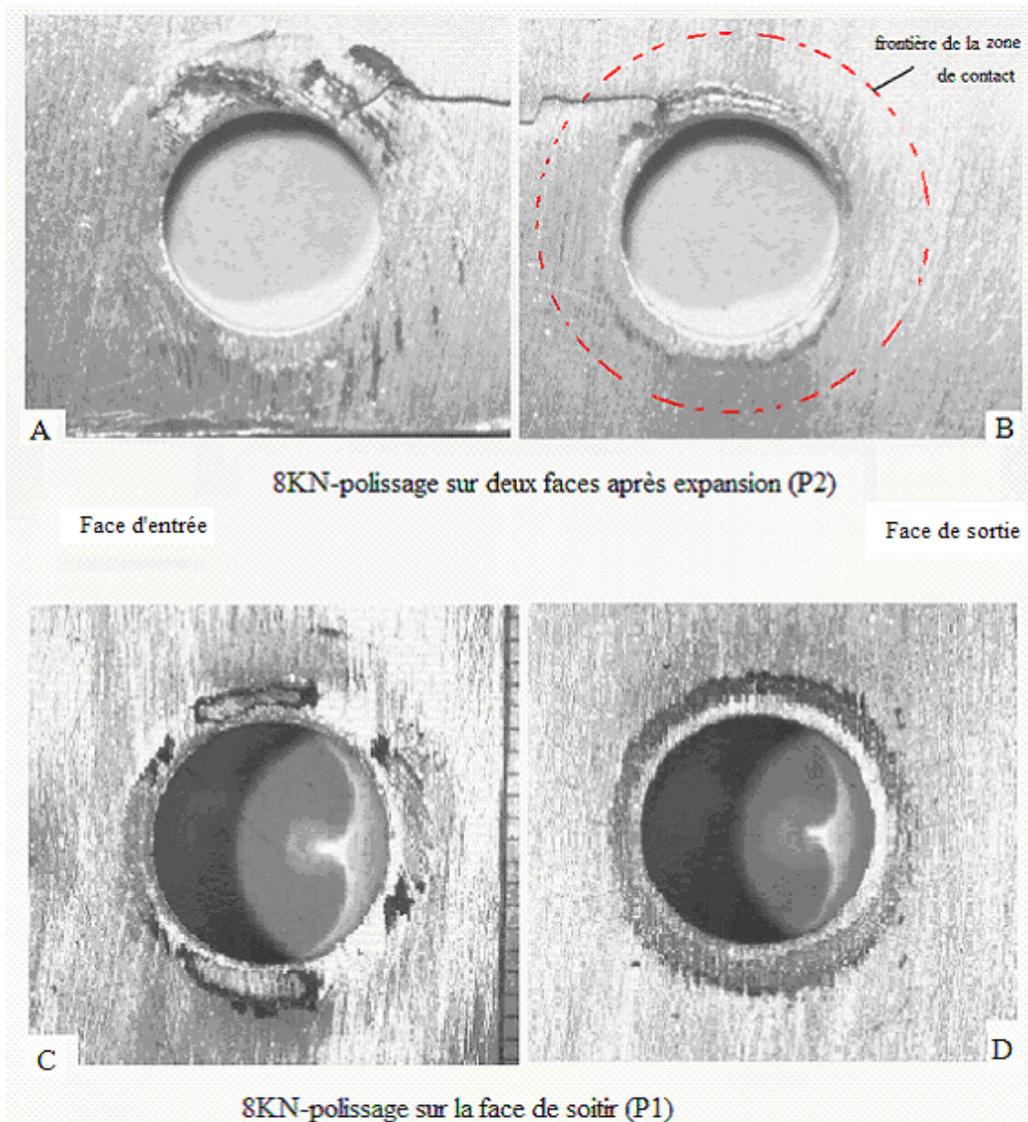


Figure 3.56 La comparaison de l'endommagement sur la surface du contact entre l'essai avec expansion suivi d'un polissage sur deux faces et sur la face de sortie (8kN).

Les figures 3.58 et 3.60 présentent les fissures obtenues avec un effort normal de 8kN-P1 (polissage sur une face) et de 8kN-P2 (polissage sur deux faces). La différence entre les deux types de fissures est la localisation du site d'amorçage. Pour le cas d'un polissage (P1), le site d'amorçage est situé plus près du trou central et est proche de l'axe horizontal de symétrie. Pour ce cas de chargement il y a une différence au niveau des durées de vie. Le cas du polissage sur les deux faces donne une durée de vie plus grande. Pour le cas d'un effort normal de 4 kN, les fissures de l'essai 4kN-P1 (polissage sur une face) sont semblable au cas de 8kN-P1 dans la figure 3.58. Et la fissure de 4kN-P2 (polissage sur deux faces) est montrée sur la figure 3.57. Sur la figure, on note que la fissure s'amorce au bord du trou central ou s'amorce dans les marques qui sont très proches du trou central. Les durées de vie pour le chargement (4 kN P1 et P2) sont semblables.

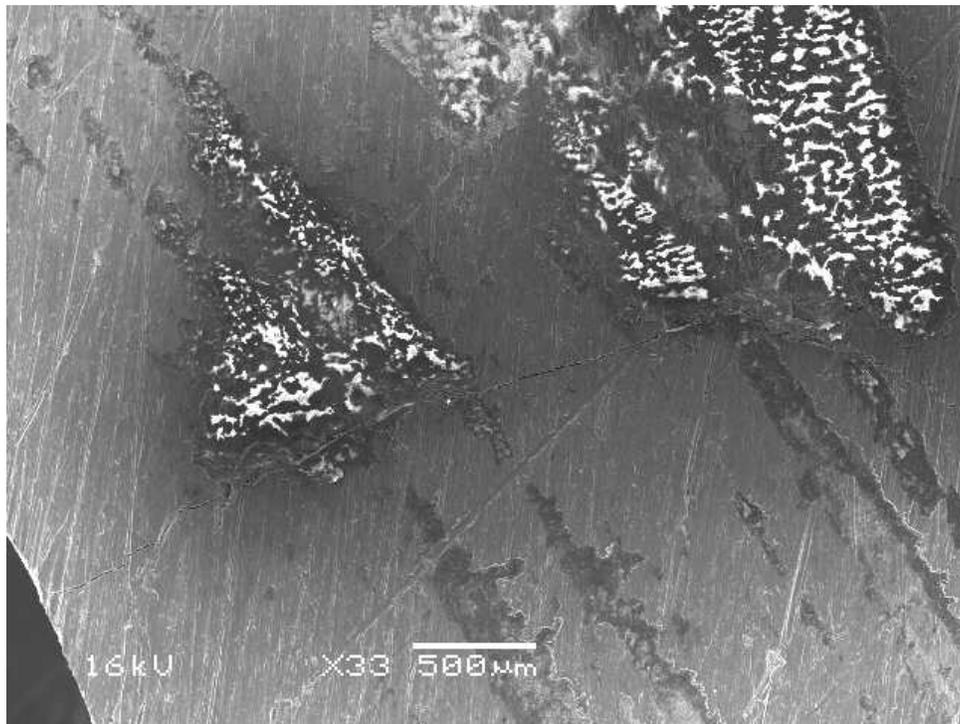


Figure 3.57 La fissure de l'essai 4kN-P2.

3.2.3.2 Aspect de la fissure pour l'essai de fretting fatigue sur une éprouvette avec expansion

- Essais de fretting fatigue sur l'éprouvette avec expansion suivi d'un polissage sur la face de sortie

Dans ce cas, la frontière de la zone de contact pour les deux faces est au voisinage du trou central. La fissure s'amorce à la frontière du contact (grande marque de frottement) et se propage vers le trou central et en profondeur (ligament) comme le montre la figure 3.58. Le site d'amorçage se situe à environ 1mm du trou. Sur la figure 3.58, on note la présence de deux fissures très fines provenant du même site d'amorçage.

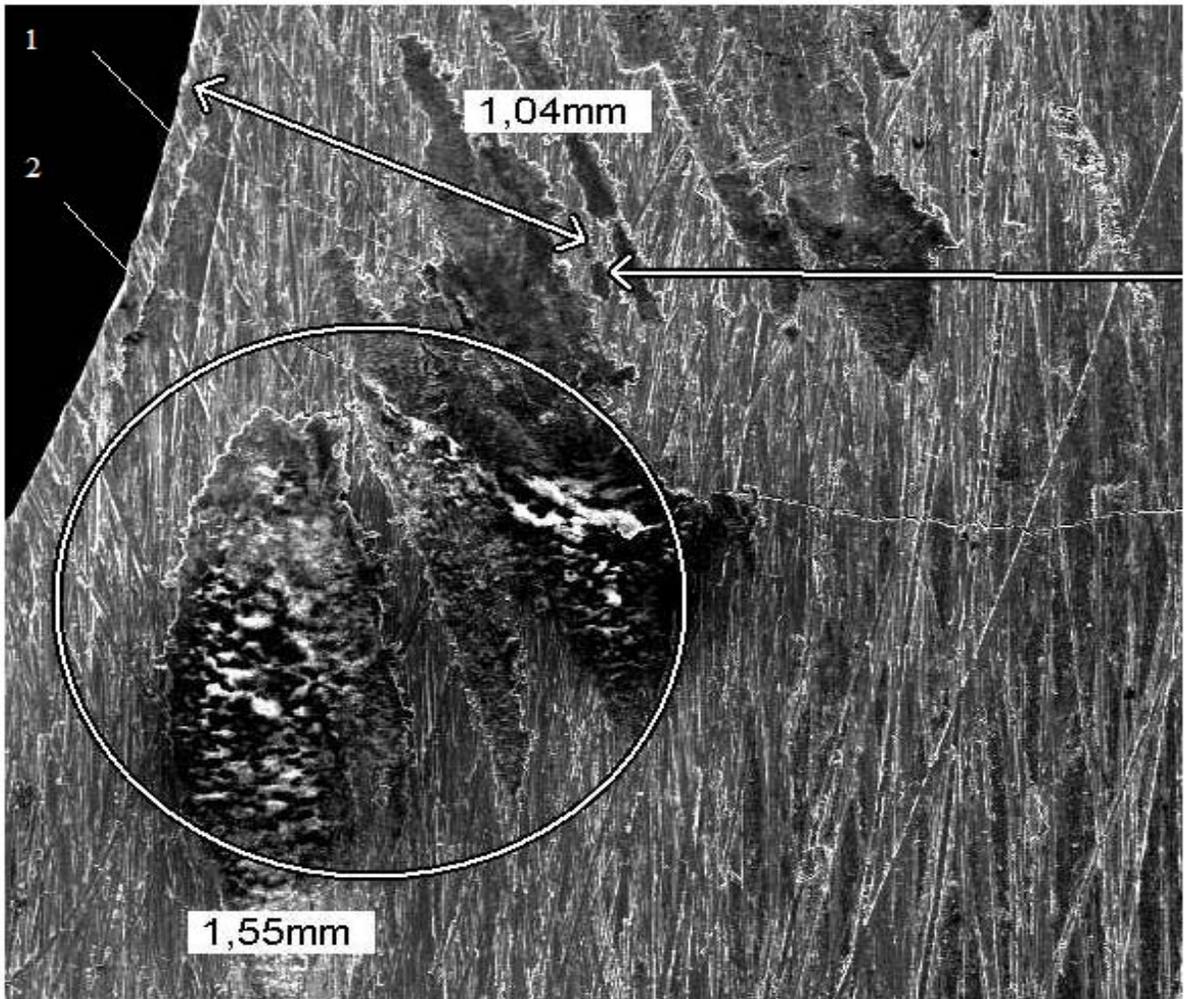


Figure 3.58 Fissure droite pour l'essai de 8kN-P1

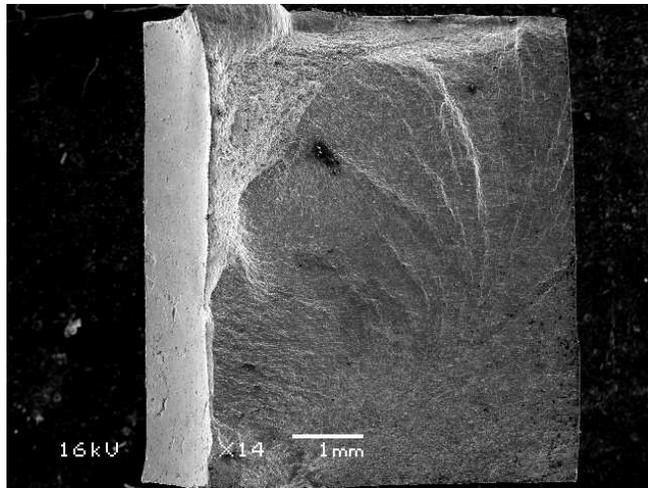


Figure 3.59 Faciès de fissure droite pour l'essai de 8kN-P1

- **Essais de fretting fatigue sur l'éprouvette avec expansion suivi d'un polissage sur les deux faces**

Dans ce cas, il y a deux types de fissures. Le premier type la fissure s'amorce au voisinage de la frontière du contact où il y a présence d'une grande marque dans la zone de contact (figure 3.60). Ce type de fissure est similaire à celui de l'essai sans expansion.

Sur la figure 3.61, on observe d'autre type de fissures pour le cas de 12kN avec un polissage sur deux faces après expansion (l'éprouvette C_5 E), les fissures 1, 2 et 3 s'amorcent à la frontière du contact où il y a présence de grande marque, mais les fissures 4, 5, et 6 s'amorcent au bord du trou central.

Avec l'augmentation de l'effort normal, les fissures se multiplient et s'amorcent aussi du bord du trou central.

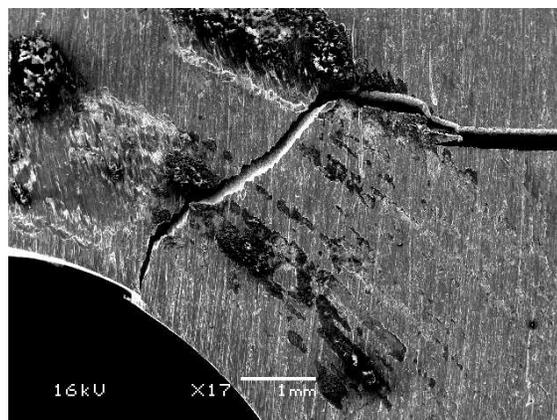


Figure 3.60 Fissure de l'essai de 8kN-P2 (C_11).

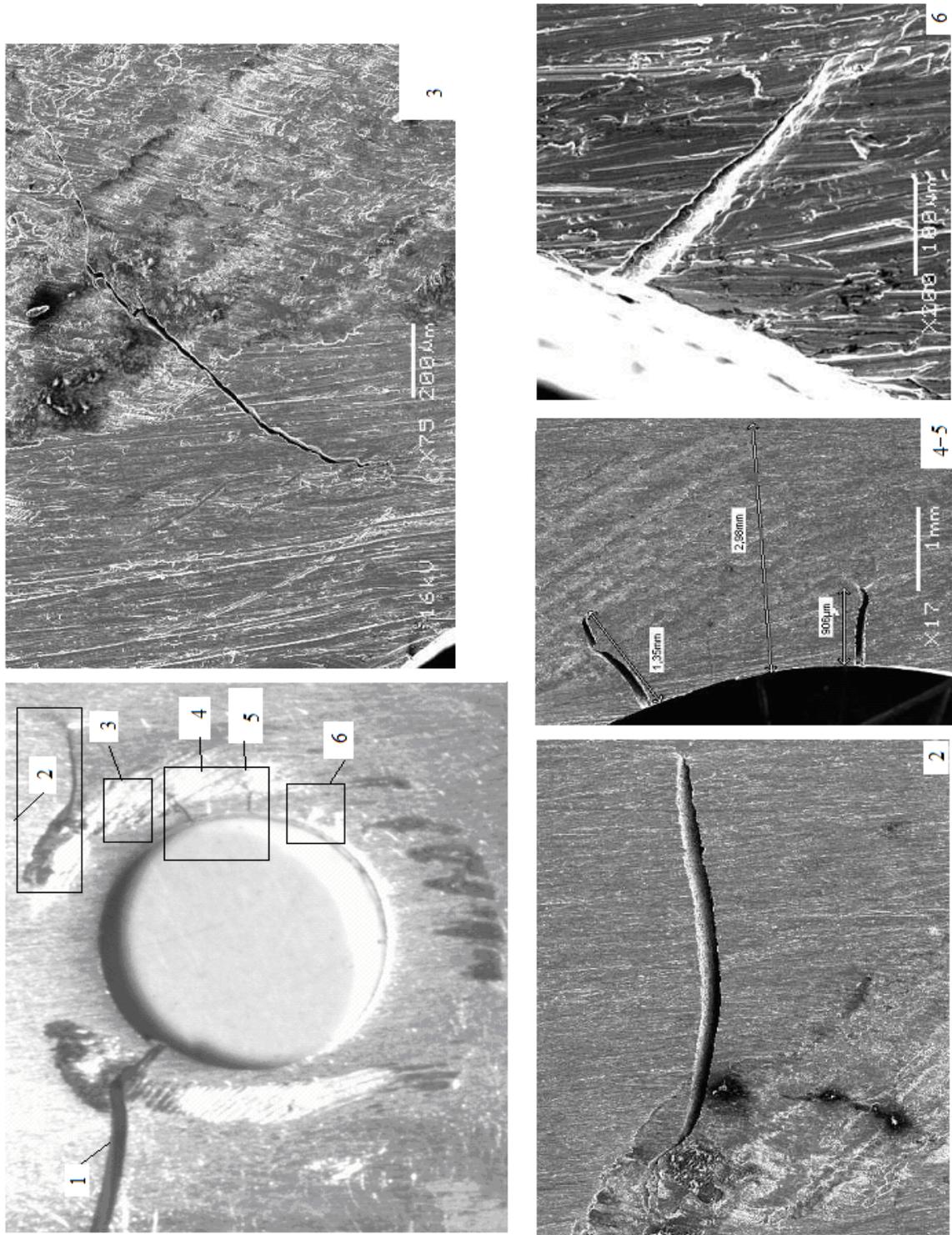


Figure 3.61 Fissures observés pour l'essai de 12kN avec polissage sur deux faces après expansion (l'éprouvette C_5 E).

3.2.4 Analyse micrographique avec différents coefficients de frottement

Dans ce cas, les éprouvettes plus petites sont utilisées. La largeur de contre-corps est plus grande que la largeur de l'éprouvette comme la figure 3.62 l'indique.

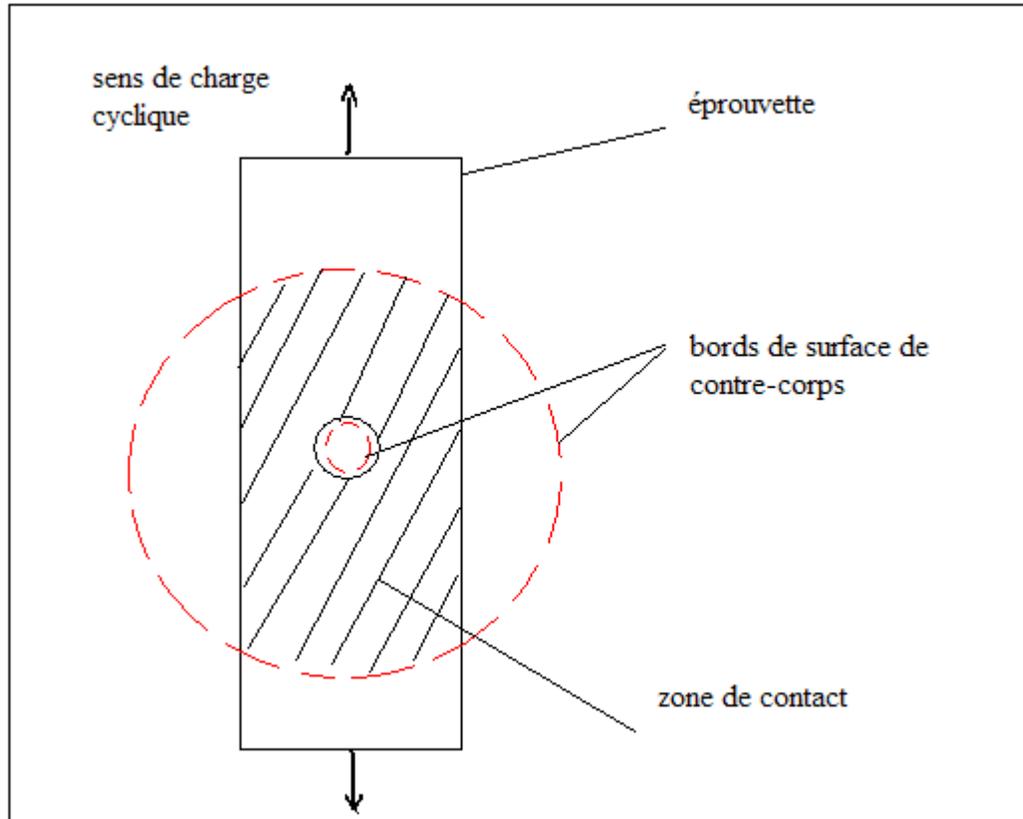
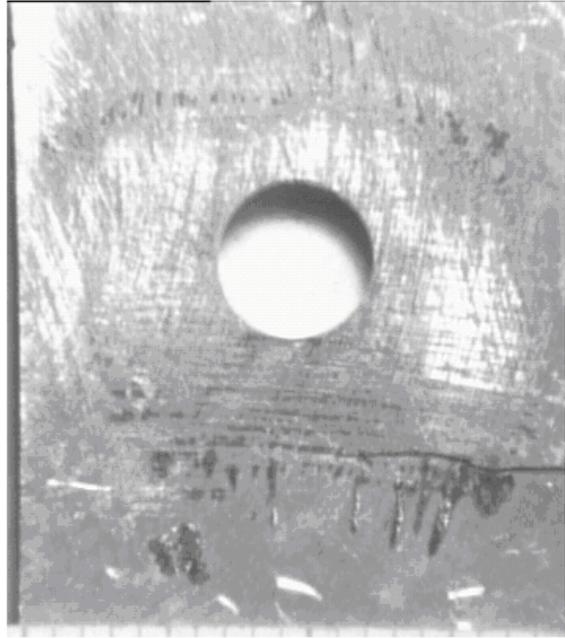


Figure 3.62 Schématisation du contact pour l'essai de fretting fatigue pour différents coefficients de frottement avec un trou central.

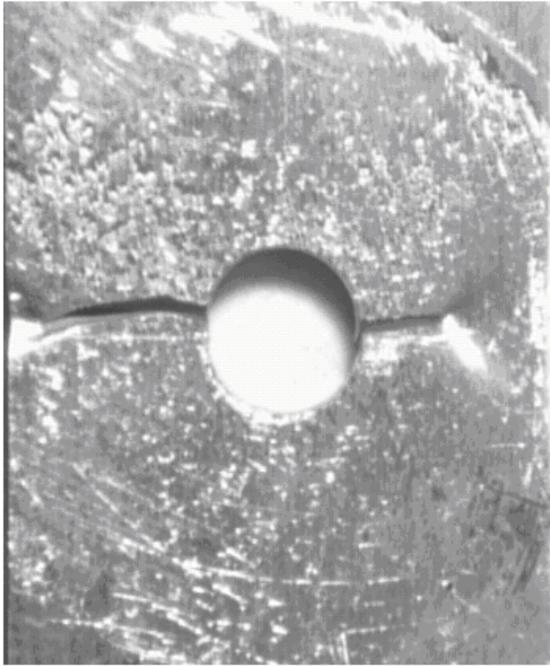
La figure 3.63 montre l'aspect de l'éprouvette après l'essai de fretting fatigue. Notons que l'augmentation du coefficient de frottement, induit une augmentation de la densité et de la profondeur des marques de frottement.



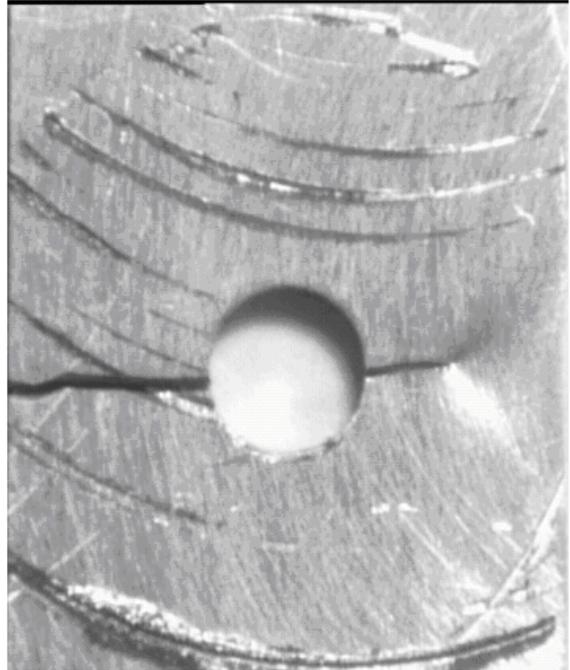
coefficient de
0,049



coefficient de
0,068



coefficient de
0,117



coefficient de
0,167

Figure 3.63 Aspect des surfaces des éprouvettes avec un trou central des essais de fretting fatigue pour différents coefficients de frottement.

Pour l'essai avec un coefficient de frottement de 0,049, la fissure s'amorce sur une grande marque de frottement à la frontière de la zone contact comme le montre la figure 3.64. Pour l'essai avec un coefficient de frottement de 0,068, le site d'amorçage se trouve à la frontière de la zone du contact. Pour les essais avec des coefficients de frottement de 0,117 et 0,167, les fissures s'amorcent sur le bord de trou central (figure 3.63). La durée de vie pour ces essais est beaucoup plus petite que celle des essais avec des coefficients de frottement de 0,049 et 0,068.

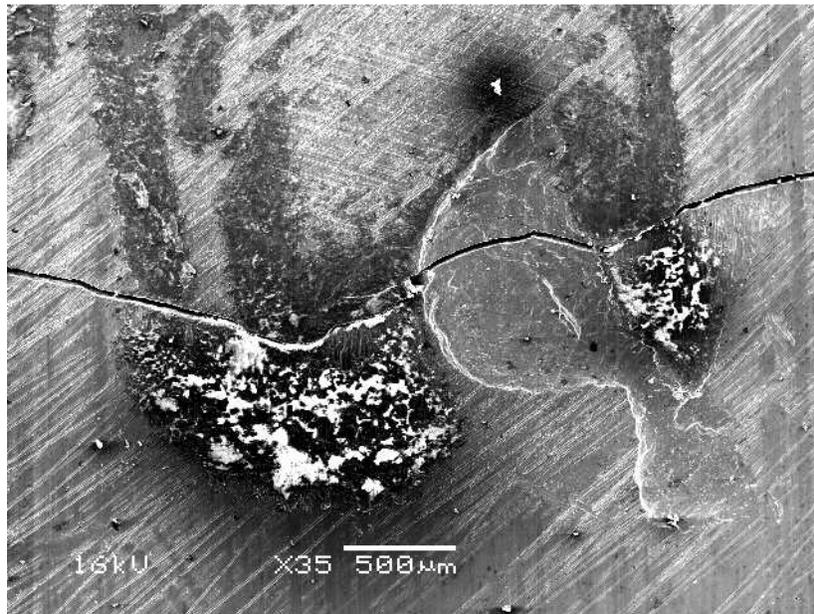


Figure 3.64 Site d'amorçage de fissure pour l'essai avec un coefficient de frottement de 0,049.

3.2.5 Analyse micrographique sur des assemblages boulonnés (Alu-Acier) avec un trou expansé et sans expansion après essais de fretting fatigue

La figure 3.65, montre que l'aspect du contact de l'éprouvette d'aluminium après l'essai, au voisinage du trou, introduit une zone avec des marques de frottement de forme elliptique. La fissure s'amorce dans la partie basse du trou. La direction de la propagation de la fissure n'est pas perpendiculaire à la direction du chargement cyclique mais prend une direction inclinée (θ est environ 25°).

Notons que le trou initialement de forme circulaire présente une forme elliptique dûe aux déformations. Cette déformation est introduite par le boulon. Dans la partie supérieure du trou, il existe une zone de déformation plastique.

La figure 3.66 montre le faciès de rupture de l'éprouvette E2. Le site d'amorçage ne se trouve pas au bord du trou central, mais est localisé sur la surface dans la zone de contact. La fissure débouche sur le trou central.

L'expansion ne donne pas assez de différence sur la fissuration par rapport aux cas sans expansion.

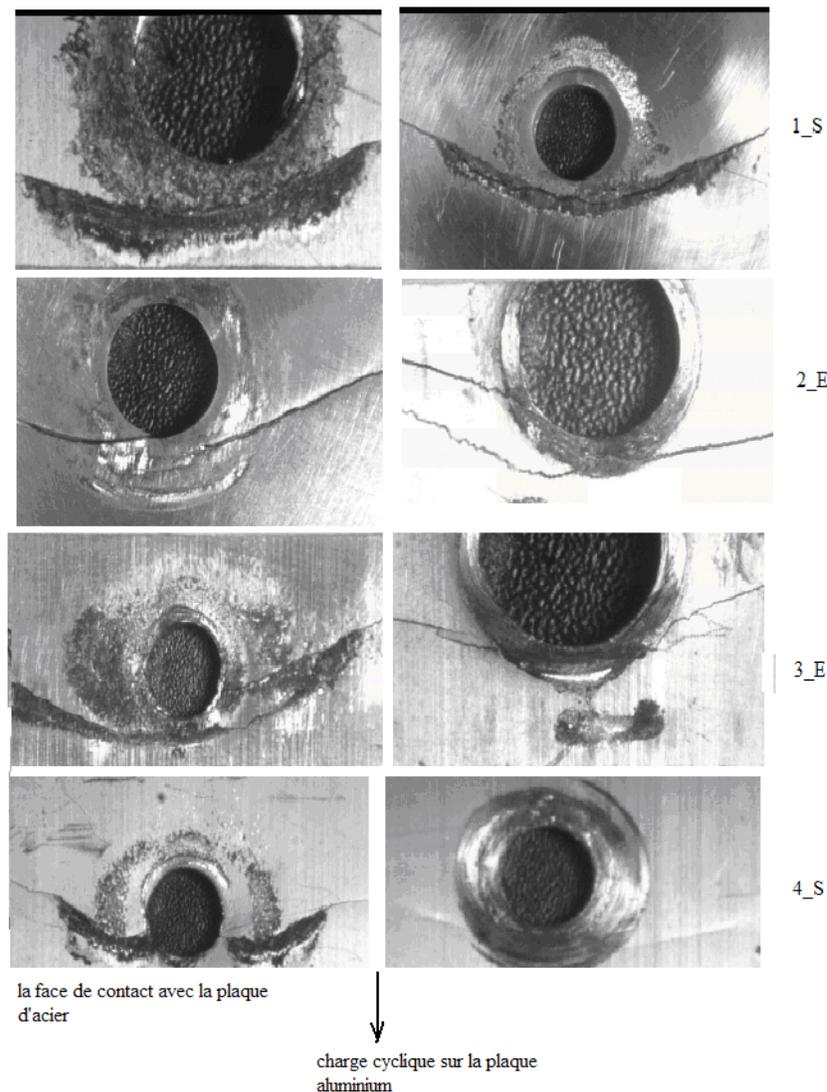


Figure 3.65 Fissures de l'éprouvette en aluminium pour les essais de fretting fatigue sur des assemblages boulonnés (Alu-Acier) avec un trou expansé et sans expansion.

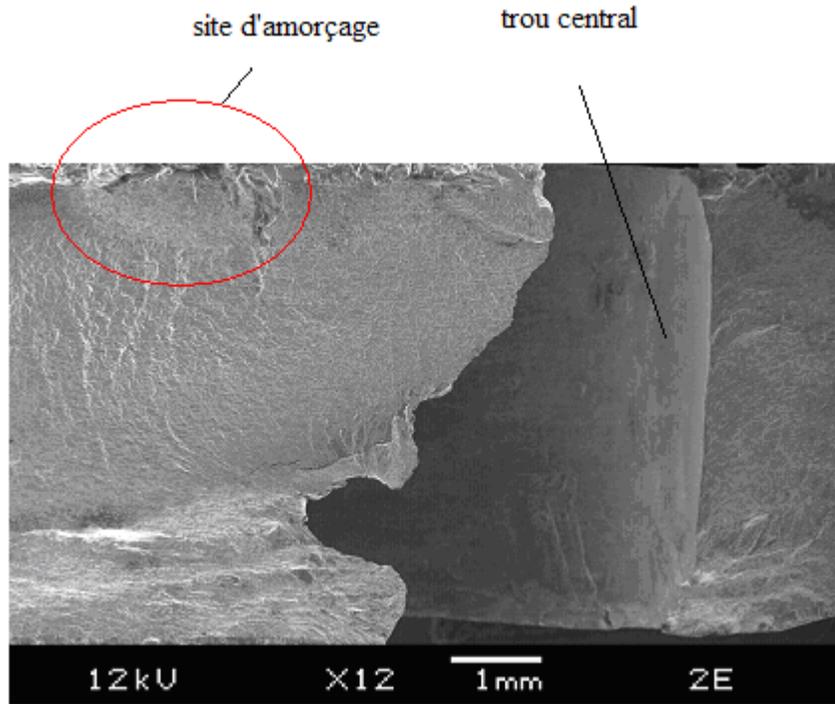


Figure 3.66 Site d'amorçage pour l'essai de fretting fatigue sur des assemblages boulonnés (Alu-Acier) avec un trou expansé (2E).

IV RESULTATS DE CALCUL NUMERIQUE

Dans cette partie, nous présentons le calcul numérique en utilisant le code ANSYS. Nous avons utilisé un modèle simplifié de l'éprouvette (1/8) comme le montre la figure 4.1. Dans la modélisation, l'élément utilisé est quadrangulaire à 8-nœuds, cet élément est souvent utilisé pour les cas élasto-plastique et pour le contact.

Le cas de la fatigue sans contact a été traité dans un premier temps. Le maillage du modèle est montré sur figure 4.2. Le modèle de fatigue contient 23064 éléments. La longueur minimale de la maille est 0,14 mm. La charge utilisée est la valeur maximale de la charge cyclique, cette charge est uniformément répartie sur la surface. Dans le modèle, nous avons 3 surfaces de symétrie correspondant au plan (xoy), (yoz) et (xoz). Dans la partie centrale, le maillage est plus fin. La figure 4.3 montre la courbe ($\sigma - \epsilon$) de comportement du matériau utilisé.

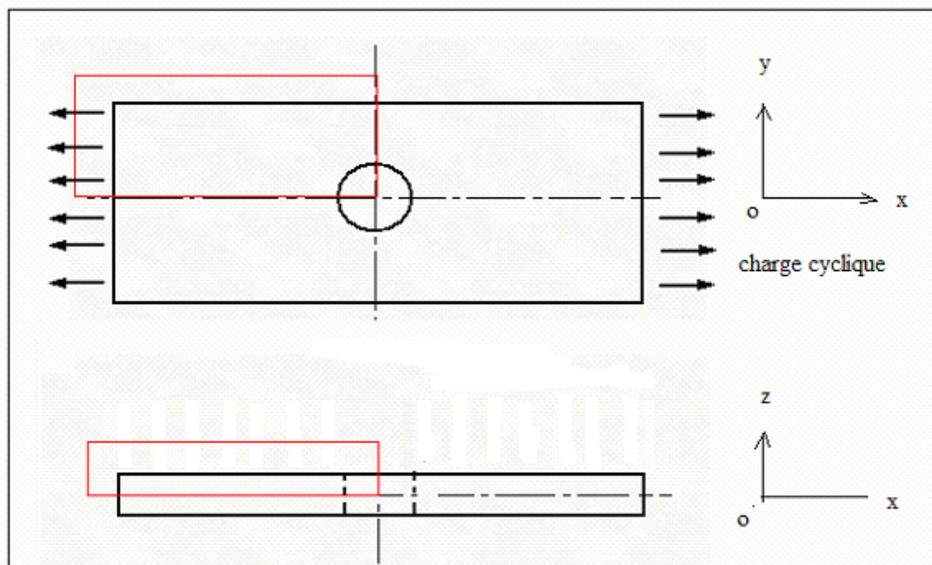


Figure 4.1 Simplification de modèle de l'éprouvette à 1/8.

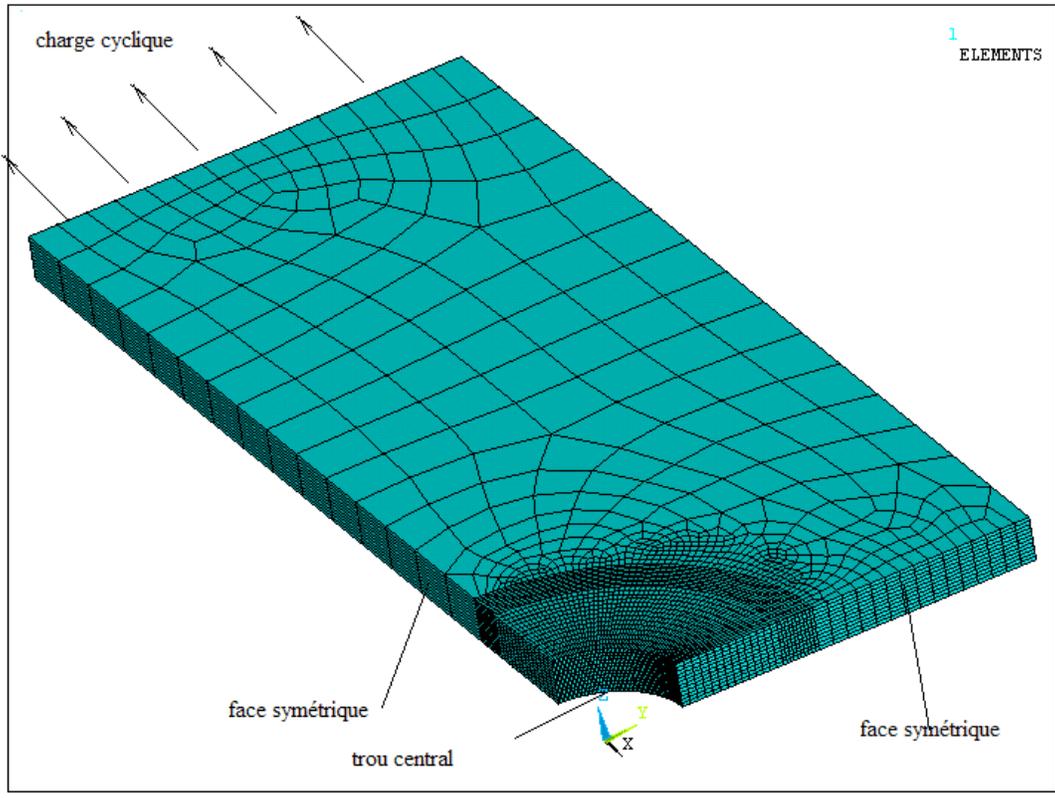


Figure 4.2 Maillage pour le modèle simplifié (1/8).

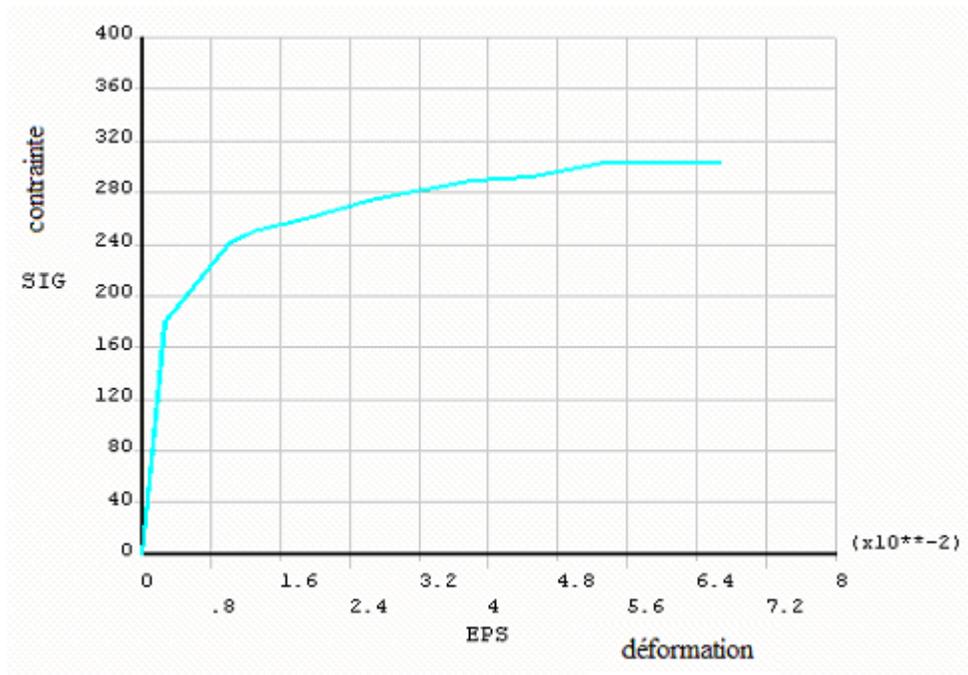


Figure 4.3 Courbe contrainte - déformation du matériau utilisée dans le modèle.

La figure 4.4 présente le champ de contraintes de VON MISES. Selon le calcul, la valeur maximale (222 MPa) se trouve au bord du trou central localisé sur la surface de symétrie horizontale. Sur la zone avec la valeur maximale, le coefficient de concentration de contrainte est environ 2. La valeur minimale (20 MPa) se trouve sur l'axe des x et au voisinage du trou central. La valeur maximale est 10 fois plus grande que la valeur minimale. La valeur de la contrainte au point A pour un angle de 45° par rapport à l'axe (y) est 142 MPa.

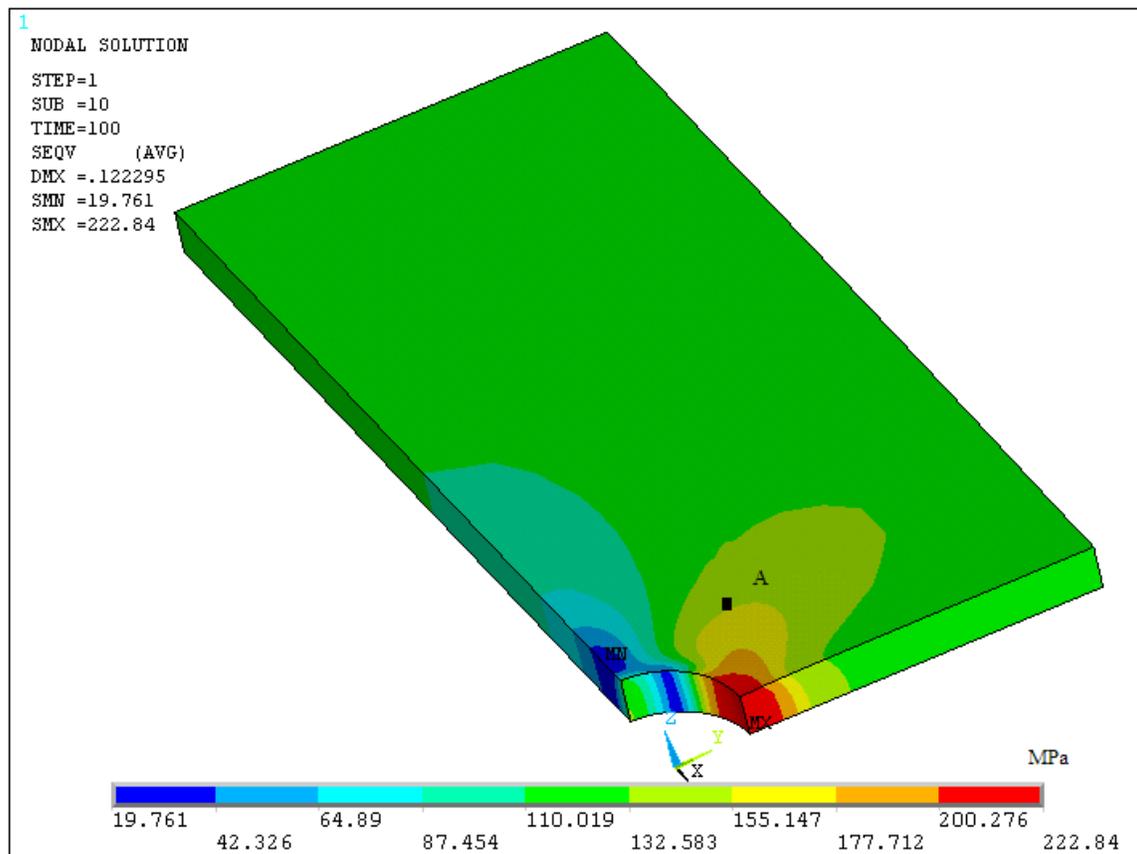


Figure 4.4 Contrainte de VON MISES. (Point A situé à la direction de 45° et correspond à la frontière du contact dans l'essai de fretting fatigue).

La figure 4.5 présente le champ de déplacements UX - la direction de x (direction de la charge). La distribution montre que le déplacement maximal est de l'ordre de 33 µm situé sur l'axe (-x) dans la direction de chargement, et plus loin que le bord du trou.

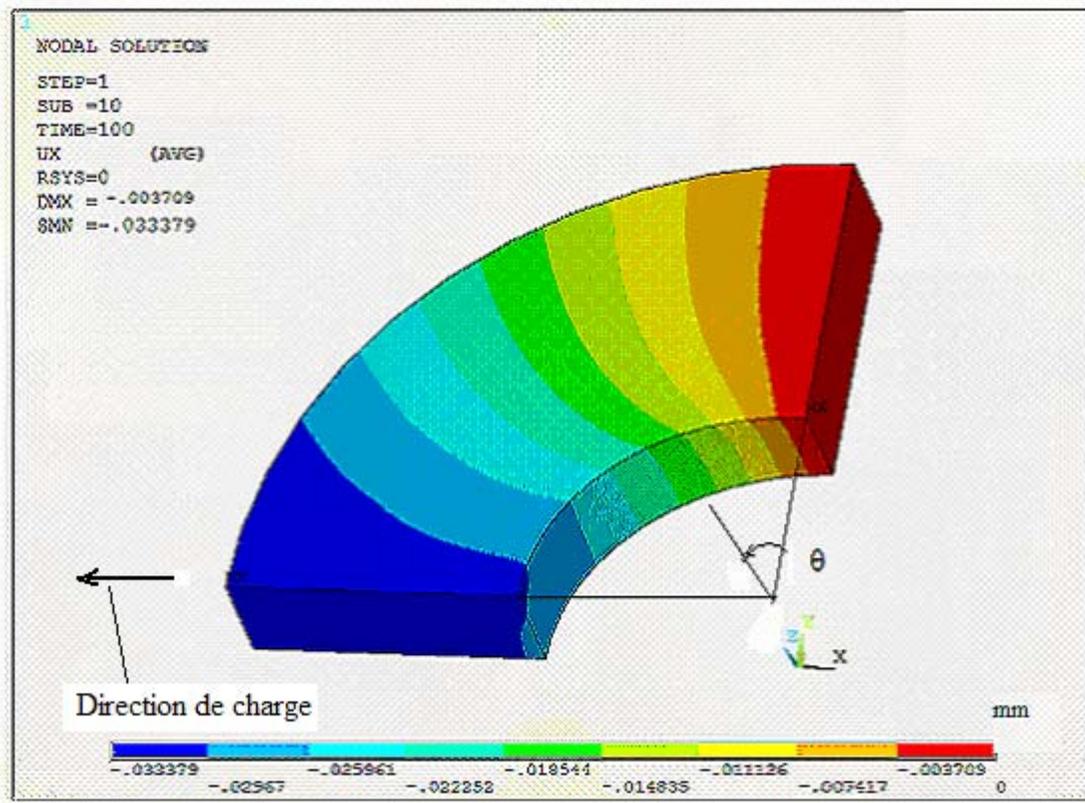


Figure 4.5 Déplacement UX selon la direction de x (direction de charge).

Pour le cas de fretting fatigue, on ajoute au modèle précédent, le contre-corps comme le montre la figure 4.6. Le matériau du contre-corps est un acier avec un module de Young E de $2,06E5$ MPa et un coefficient de Poisson ν de $0,27$. L'effort normal est appliqué comme une charge uniformément répartie sur la surface du contre-corps.

Afin de diminuer le nombre d'éléments et d'obtenir la solution exacte, on adopte une technique sur le code ANSYS qui consiste à la division du modèle. D'abord on fait le calcul avec le modèle entier comme l'indique la figure 4.6. Après on refait le calcul seulement avec le modèle de la partie centrale comme le montre figure 4.7 mais avec des éléments de plus petite taille. Dans ce dernier modèle, on applique les valeurs du déplacement du modèle entier à la frontière de ce modèle. Un couple d'éléments de contact (surface à surface) est utilisé pour le calcul avec contact de surface. Le contact est flexible et le coefficient de frottement entre l'acier et l'alliage d'aluminium est $0,05$.

30486 éléments (solide et contact) sont utilisés dans ce modèle et la maille minimale du maillage est de 0,18 mm.

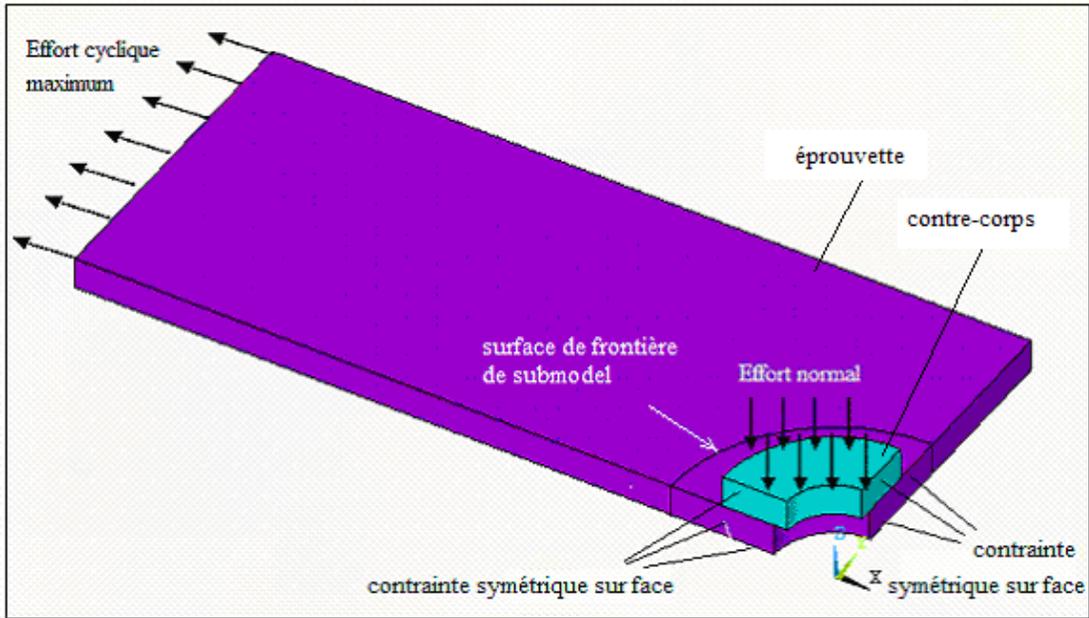


Figure 4.6 Modèle simplifié (1/8) : essai de fretting fatigue avec un trou central.

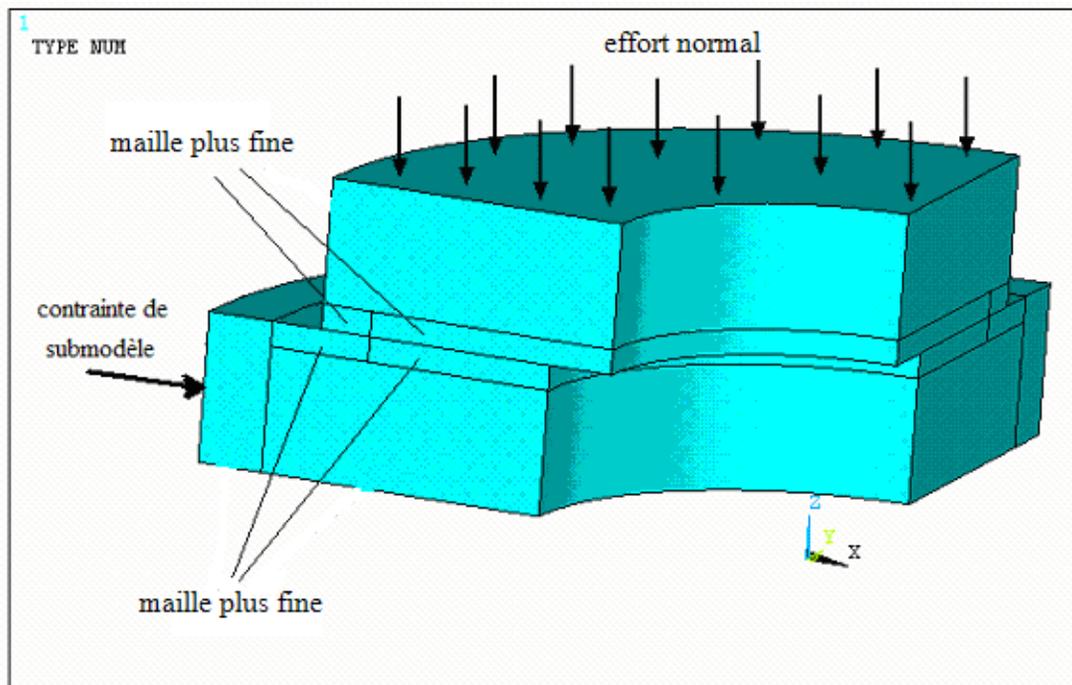


Figure 4.7 Modèle simplifié : essai de fretting fatigue avec un trou central.

On commence le calcul avec la même valeur de coefficient de frottement de 0,05 et ce pour différentes valeurs de l'effort normal de 3, 6, 8, 12, et 15 kN. Ensuite on fait le calcul avec le même effort de 8kN mais différent coefficient de frottement de 0.05, 0.07, 0.12, 0,17, 0.25, et 0.4. Dans tous les cas, pour le champ des contraintes, des déformations, et des déplacements est très similaire quelques soit l'effort normal ou le coefficient de frottement. On présente ci-dessous les résultats avec une charge de 3kN.

La figure 4.8 montre le champ de déplacements UX sur la surface de l'éprouvette pour le cas du fretting fatigue. En comparant les déplacements pour le cas de fretting fatigue (figure 4.8) avec le cas de la fatigue (figure 4.5), la différence est insignifiante. La figure 4.9 présente les déplacements de l'éprouvette et du contre-corps. On peut noter que le déplacement du contre-corps reste constant sur toute la surface, et sa valeur est moins que 3,2 μm . C'est très petite devant celle de l'éprouvette (32 μm). Le champ de déplacements relatifs entre l'éprouvette et le contre - corps est sensiblement le même que le champ de déplacements de l'éprouvette. La valeur maximale du déplacement relative est d'environ 0,03mm.

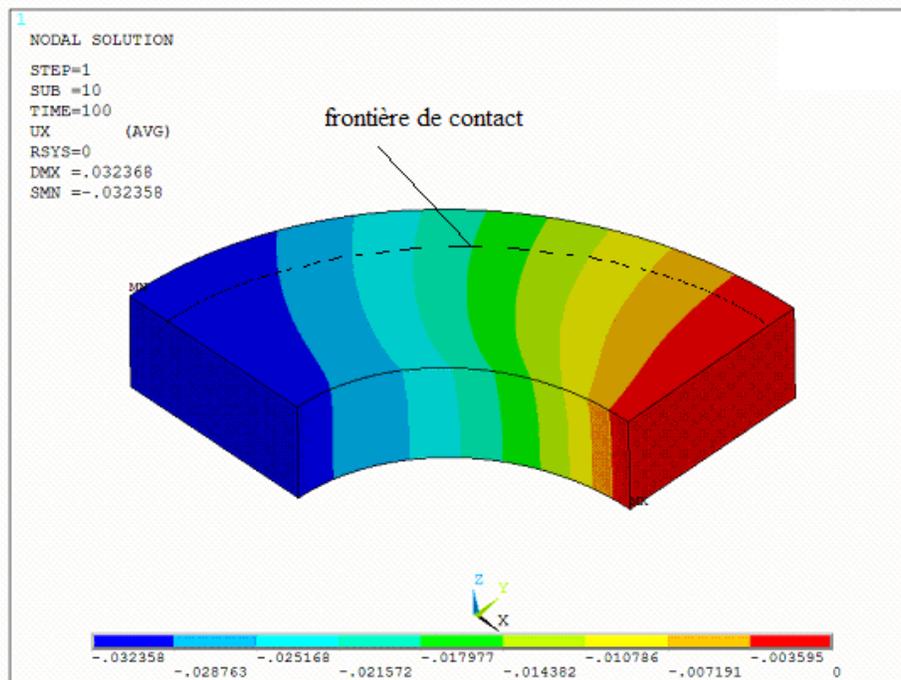


Figure 4.8. Déplacement UX sur la surface de l'éprouvette pour l'essai de fretting fatigue pour un effort normal de 3kN (Unité : mm).

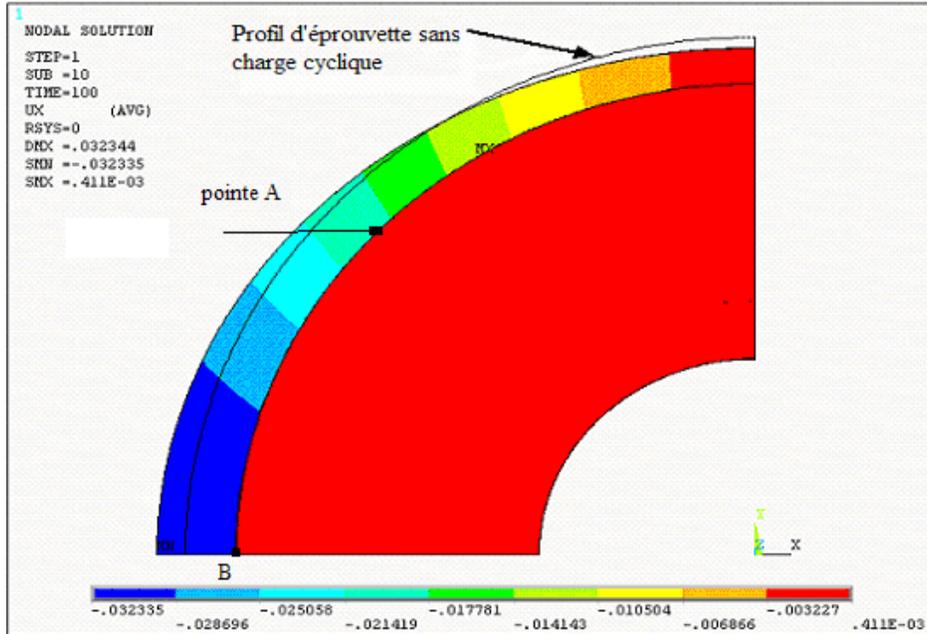


Figure 4.9. Déplacement UX (direction de la charge cyclique) et de contre-corp pour l'essai de fretting fatigue pour un effort normal de 3 kN (Unité : mm).

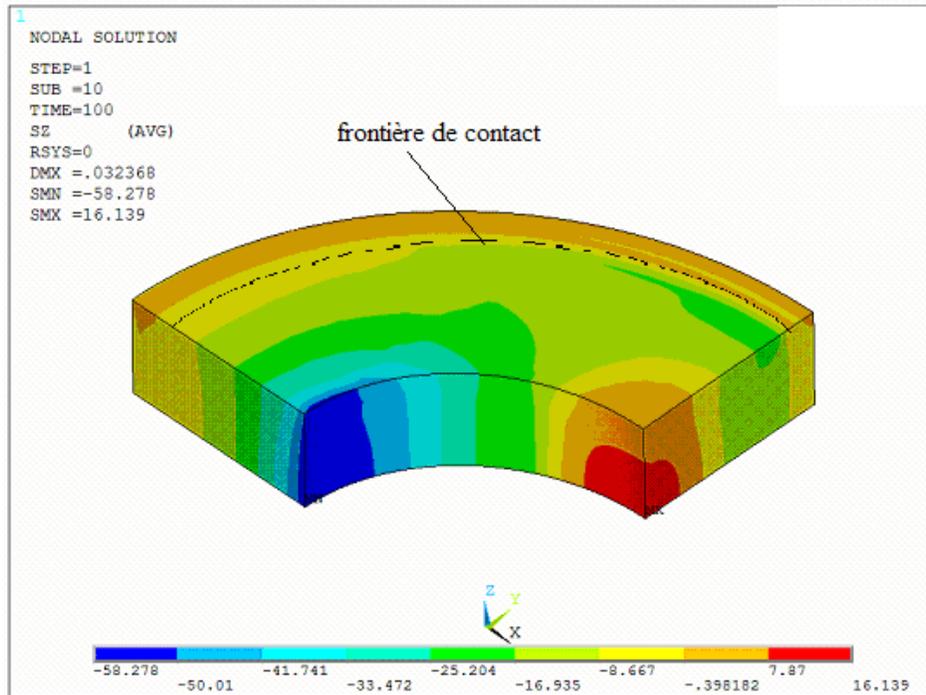


Figure 4.10. Contraintes normale (SZ) sur la surface de l'éprouvette pour l'essai de fretting fatigue pour un effort normal de 3kN.

La figure 4.10 présente le champ de la contrainte, selon la direction de z (direction de

l'effort normal), sur la surface du contact de l'éprouvette pour l'essai de fretting fatigue pour un effort normal de 3kN. Notons que sur la surface du contact, le champ n'est pas uniforme. La valeur absolue maximale se trouve au point central au bord du trou selon la direction de l'axe x.

Les figures 4.11 et 4.12 montrent les champs de contraintes de VON MISES et de contraintes selon la direction de la charge cyclique SX (le cas de 3kN). Notons que pour les deux figures, le champ de contraintes est donné par les angles θ de 0 à 90°. La valeur maximale se trouve au point central au bord du trou avec $\theta = 0^\circ$.

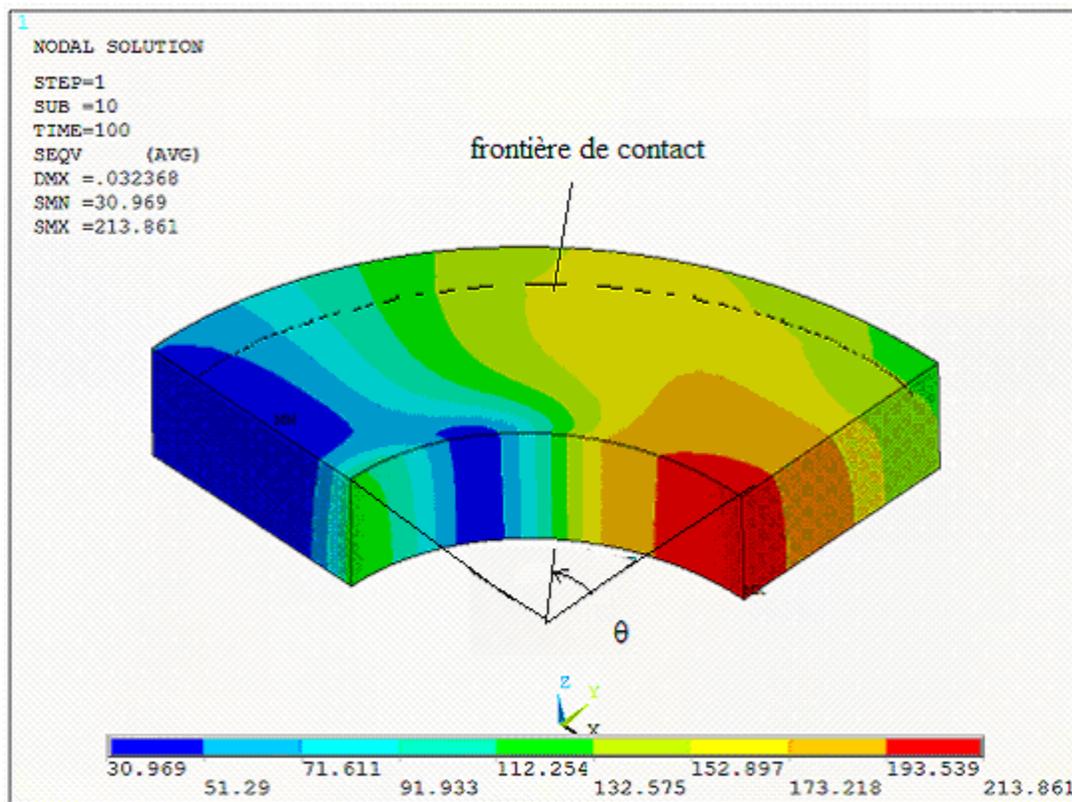


Figure 4.11. Contrainte de VON MISES sur la surface de l'éprouvette pour l'essai de fretting fatigue pour un effort normal de 3kN.

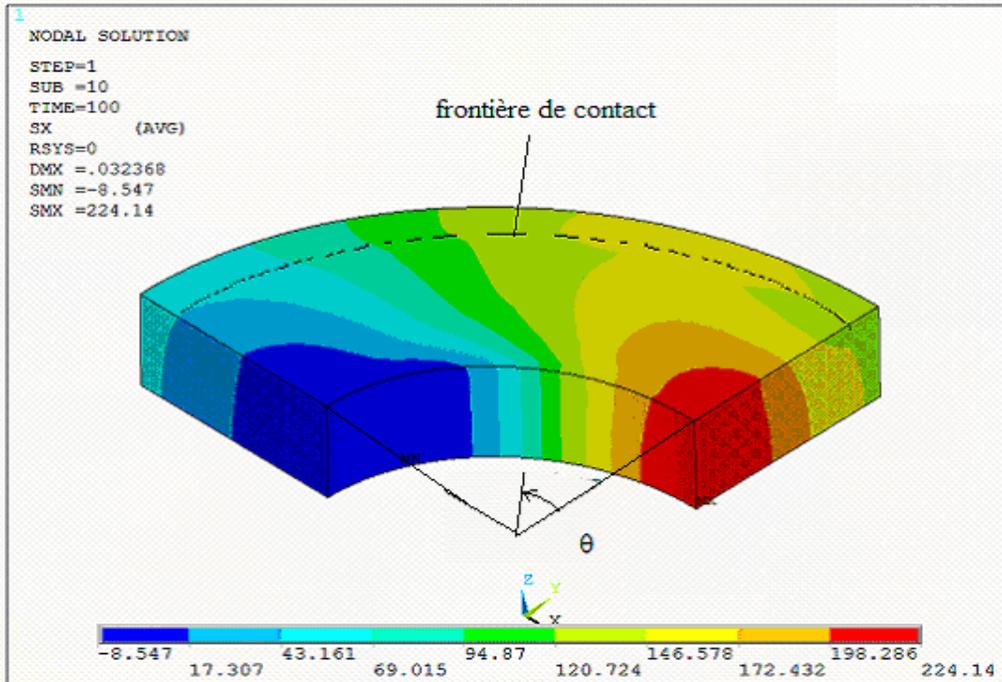


Figure 4.12. Contrainte SX selon la direction x sur la surface de l'éprouvette pour l'essai de fretting fatigue pour un effort normal de 3kN.

La figure 4.13 montre le champ de contrainte cisaillement SXY pour le cas de 3kN.

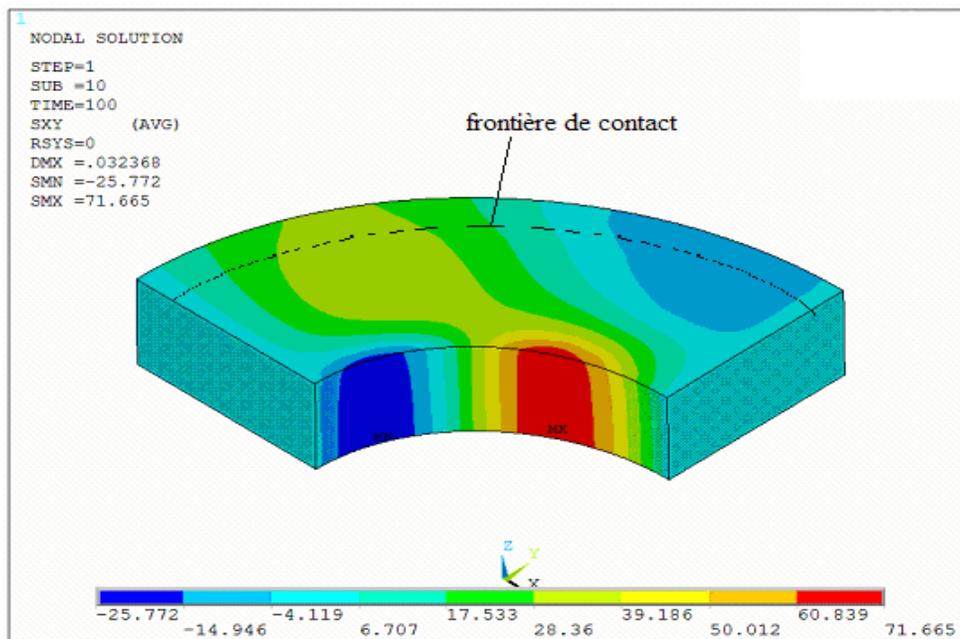


Figure 4.13. Contrainte cisaillement SXY sur la surface de l'éprouvette pour l'essai de fretting fatigue pour un effort normal de 3kN.

La figure 4.14 montre le champ de déformation plastique selon la direction de la charge cyclique. La déformation plastique maximale se trouve au bord du trou et au voisinage de $\theta = 0^\circ$. Avec l'augmentation de l'effort normal de 3 à 12kN, le champ reste sensiblement le même.

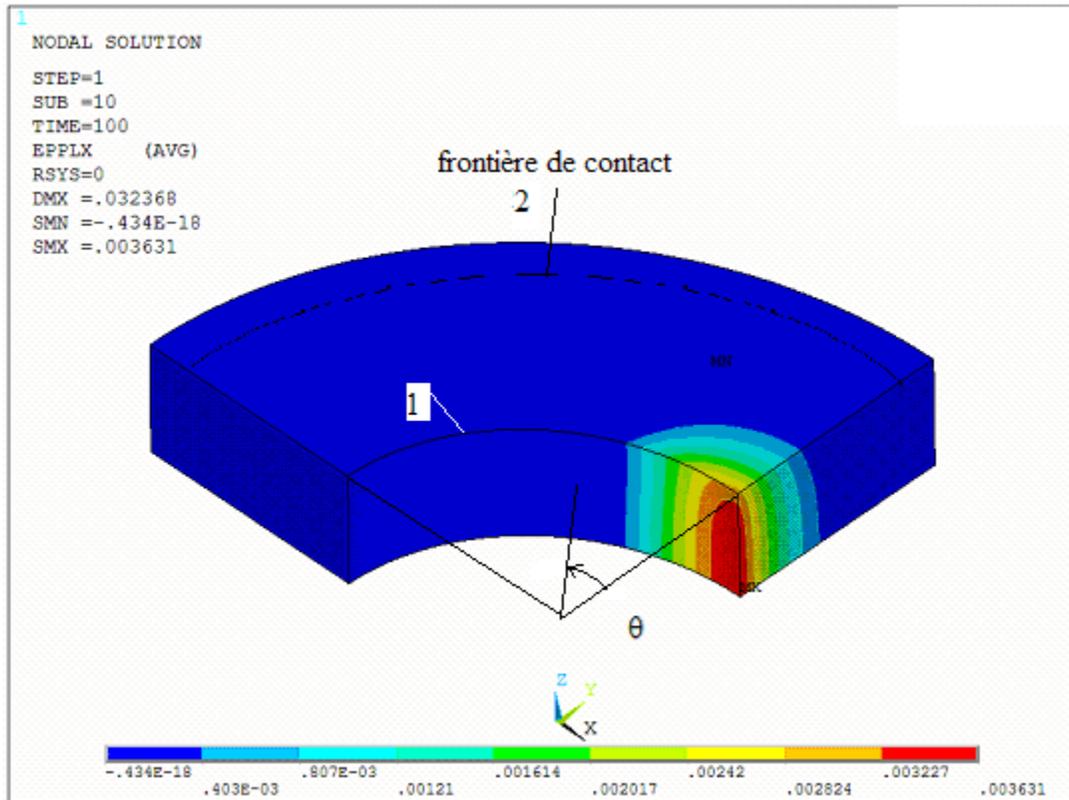


Figure 4.14. Déformation plastique sur la direction x sur la surface de l'éprouvette pour l'essai de fretting fatigue pour un effort normal de 3kN.

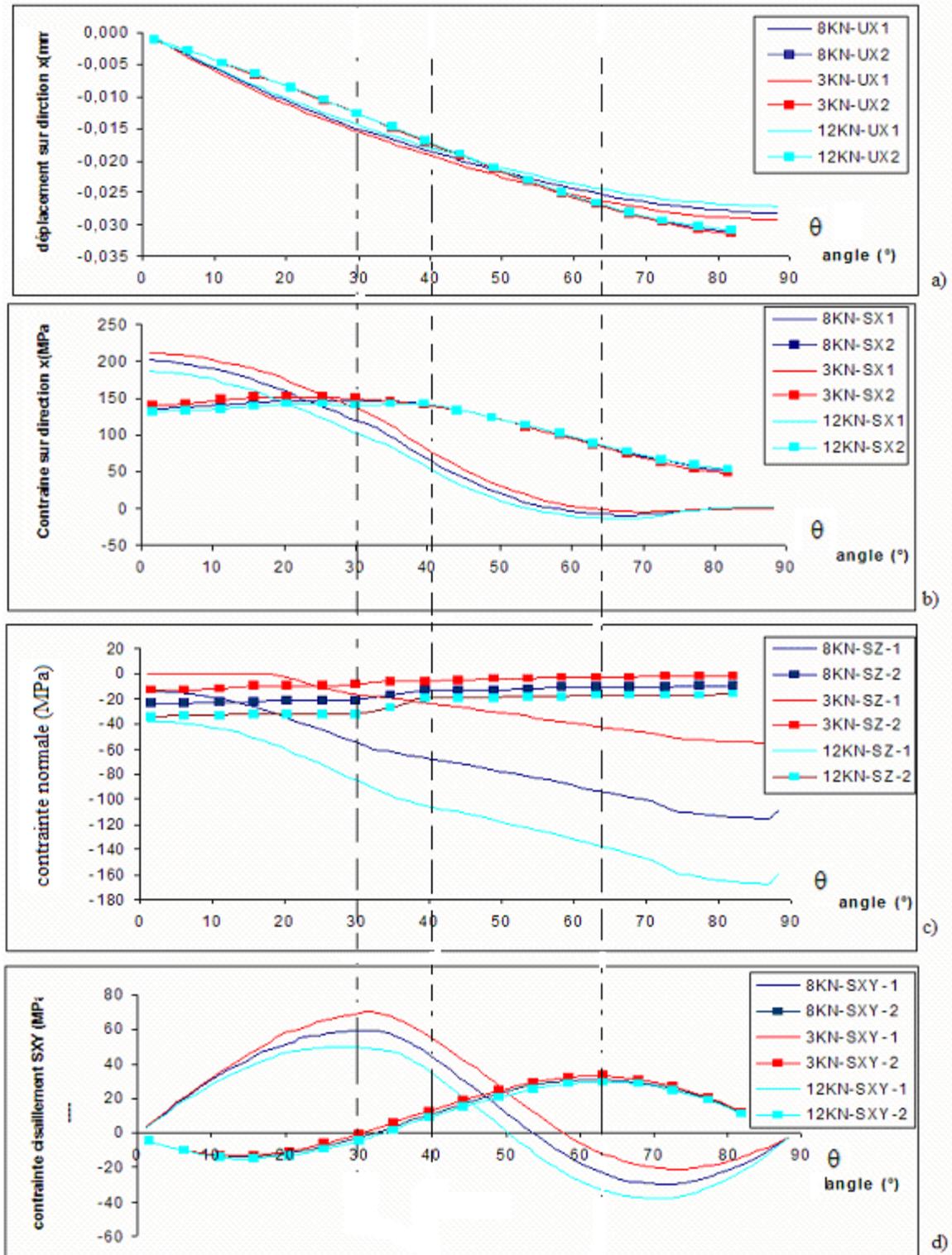


Figure 4.15 Résultat de calcul au bord du trou (1) et à la frontière du contact (2) sur la surface du contact : effort normal de 3, 8, et 12kN. a) déplacement UX, b) contrainte SX, c) contrainte SZ, d) contrainte cisaillement SXY.

La figure 4.15 présente les résultats de calcul au bord du trou (1) et à la frontière du contact (2) sur la surface du contact de l'éprouvette pour un effort normal de 3, 8, et 12kN. Sur la figure, θ est l'angle par rapport à la direction y comme l'indique la figure 4.14.

La figure 4.15 a) présente l'évolution de déplacement UX en fonction de l'angle θ . Sur la frontière du contact, la valeur absolue de déplacement croît de 0 à environ 30 μm quand θ croît de 0 à 90°. Il n'y a pas une grande différence entre les déplacements sur la surface du contact et sur le bord du trou. L'effort normal n'a pas d'influence sur le déplacement au niveau des deux zones.

La figure 4.15 b) présente l'évolution de la contrainte SX avec l'angle θ . A la frontière du contact, de 0 à 30° de θ , la valeur de contrainte SX (3kN) augmente de 140 MPa à 150 MPa. Nous remarquons aussi que les variations de l'effort normal n'ont pas d'influence sur la contrainte SX.

Au bord du trou, la valeur de contrainte SX décroît d'environ 200 MPa à une valeur égale à 0 quand θ passe de 0° à 70°. Après 70° la valeur de la contrainte reste quasiment nulle.

En comparant les résultats entre la frontière du contact et le bord du trou, on peut dire qu'il y a la même tendance globale, par contre les évolutions sont différentes entre 0° et 30° ainsi qu'entre 30° et 70°.

La figure 4.15 c) montre la contrainte normale SZ en fonction de l'angle θ . A la frontière du contact, la valeur absolue de la contrainte SZ décroît d'une valeur maximale à une valeur minimale (de 35 à 22 MPa pour le cas de 12kN par exemple) avec l'augmentation de l'angle θ de 0 à 90°. L'augmentation de l'effort normal induit une augmentation de la valeur absolue de la contrainte normale (de 37 à 170 MPa pour le cas de 12 kN par exemple).

Pour le bord du trou, l'augmentation de l'effort normal donne une augmentation de la valeur absolue de la contrainte normale SZ. La variation de l'angle θ de 0 à 90°, induit une augmentation continue de la valeur absolue de la contrainte normale SZ.

La figure 4.15 d) montre l'évolution de la contrainte de cisaillement SXY en fonction de l'angle θ . A la frontière du contact, les courbes pour 3, 8 et 12kN sont identiques. La contrainte cisaillement SXY a une valeur minimale de -15 MPa à $\theta=16^\circ$ et une valeur

nulle à $\theta=30^\circ$ et une valeur maximale d'environ 30 MPa à $\theta=65^\circ$ et prend une valeur nulle à $\theta=90^\circ$.

Au bord du trou, la valeur de contrainte cisaillement SXY a une valeur maximale à $\theta=(25-30^\circ)$, et une valeur minimale à $\theta=(70-75^\circ)$. L'effort normal a une influence sur ces valeurs extrêmes. Par exemple, la valeur maximale du cas de 12 kN est 45 MPa mais celle du cas de 3 kN est 75 MPa.

La figure 4.16 montre les distributions de contrainte normale SZ sur la frontière du contact (2) et sur un cercle à une distance de 0,33mm à l'intérieur de la frontière du contact (3). Sur cette figure nous remarquons une diminution de la contrainte SZ autour de $\theta = 30^\circ$ sur les deux zones étudiées.

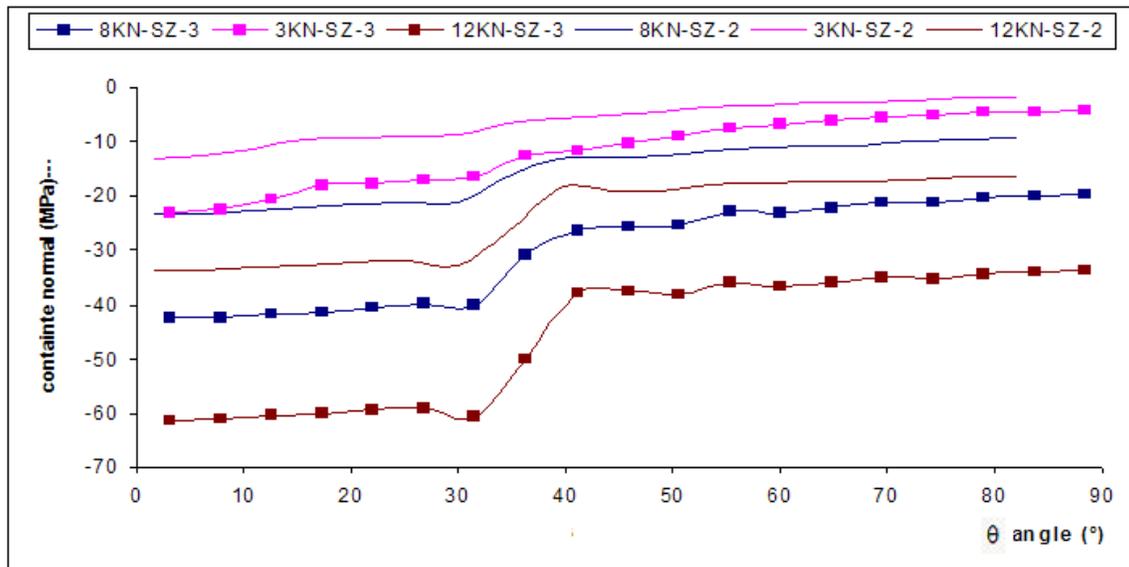


Figure 4.16 Contrainte normale SZ sur la frontière du contact (2) et la sur un cercle à 0,33mm à l'intérieur de la frontière du contact (3).

V. ANALYSE

5.1 Site de l'amorçage (Carte du Réponse du Matériau)

Dans nos essais de fretting fatigue, la durée de vie en fretting fatigue dépend « essentiellement » de la période d'amorçage de la fissure. Après amorçage, les fissures longues se propagent très vite et conduisent à la rupture. C'est connu que dans les essais de fretting fatigue, les fissures s'amorcent vers la frontière du contact. Pour les essais de fretting fatigue pour différents efforts normaux sur des éprouvettes avec un trou central, les sites d'amorçage se situent à la frontière du contact avec θ entre de 40° à 60° comme figure 5.1 montre.

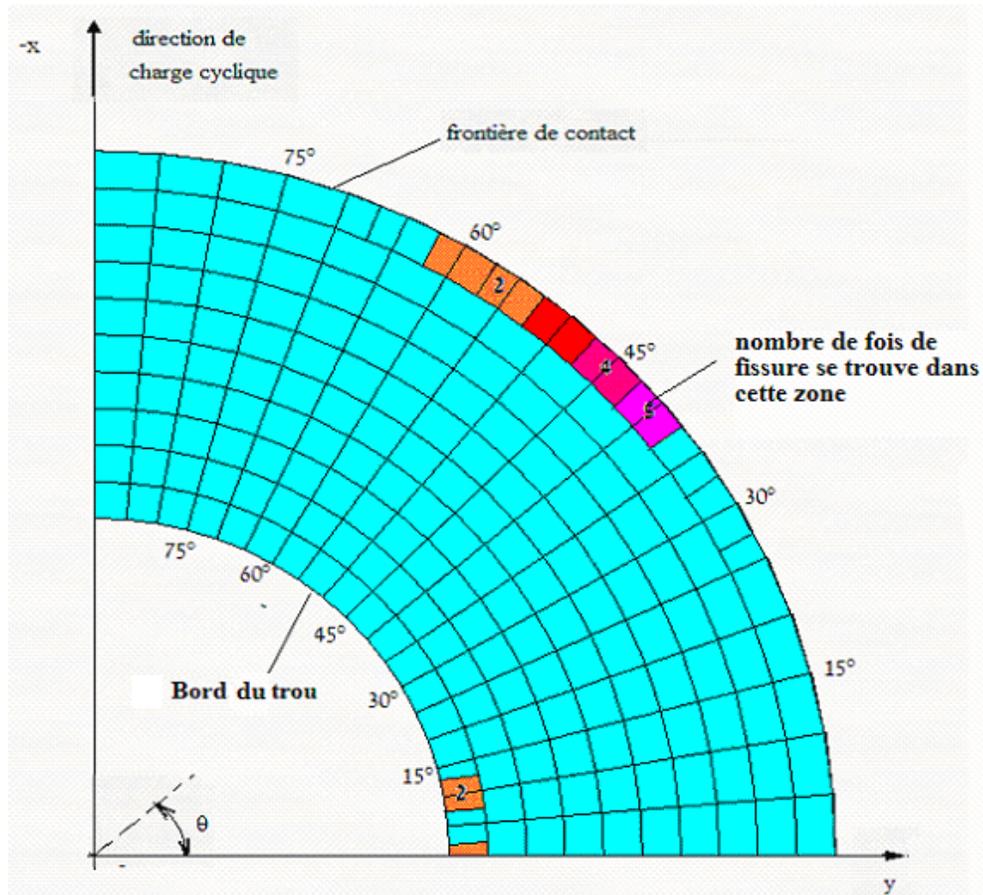


Figure 5.1 Les sites de fissuration pour les essais de fretting fatigue pour une éprouvette avec un trou central

Eprouvette	Durée de vie	Fissure	Fissure type	$\theta(^{\circ})$	Déplacement (μm)	SZ (MPa)	SX (MPa)
c9	64 000	0kN-145MPa-1	G -B	0	-	-	202
		0kN-145MPa-2	G -B	2	-	-	201
c7	246 000	4kN-145MPa-1	G -B	10	5,8	3,0	190
		4kN-145MPa-2	G -B	10	5,8	3,0	190
		4kN-145MPa-3	M -F	40	17,2	7,5	140
		4kN-145MPa-4	M -F	40	17,2	7,5	140
c6	500 000	6kN-145MPa-1	G -F	45	19,4	9,6	130
		6kN-145MPa-2	M -F	45	19,4	9,6	130
		6kN-145MPa-3	M -F	45	19,4	9,6	130
c1	770 000	8kN-145MPa-1	G -F	40	17,2	13,1	140
		8kN-145MPa-2	G -F	40	17,2	13,1	140
		8kN-145MPa-3	M -F	55	23,8	11,3	105
c16	608 000	10kN-145MPa-1	G -F	40	17,2	15,9	140
		10kN-145MPa-2	G -F	55	23,8	14,6	105
c8	663 000	12kN-145MPa-1	G -F	50	21,6	18,8	118
		12kN-145MPa-2	G -F	62	26,3	17,3	90
		12kN-145MPa-3	M -F	55	23,8	17,9	105
		12kN-145MPa-4	M -F	45	19,4	18,9	130
c2	860 000	8kN-130MPa-1	G -F	45	19,4	11,4	115
		8kN-130MPa-2	G -F	50	21,7	11,0	105

Tableau 5.1 Fissures et sites de l'amorçage pour les essais de fretting fatigue sur des éprouvettes avec un trou central (G : grande fissure, M : microfissure, B : amorce au bord du trou, F : amorce à la frontière du contact).

Le tableau 5.1 présente toutes les fissures de fretting fatigue pour différents efforts normaux sur des éprouvettes avec un trou central. Dans ce tableau, les caractéristiques des sites d'amorçage (degré θ° , déplacement relatif, SZ, SX) sont données. Les valeurs

du déplacement UX, de la contrainte normal SZ, et de la contrainte SX sont issues du calcul numérique.

On peut utiliser la Carte de Réponse du Matériau (CRM) pour expliquer les phénomènes de la fissuration en fretting fatigue.

Pour obtenir la Carte de Réponse du Matériau (CRM), on représente les contraintes normales en fonction du déplacement pour tous les sites des amorçages des fissures (qui s'amorce à la frontière du contact). En vue d'identifier les différentes zones dans la CRM, on a pris toutes les valeurs des points à la frontière du contact pour tous les essais comme l'indique figure 5.2.

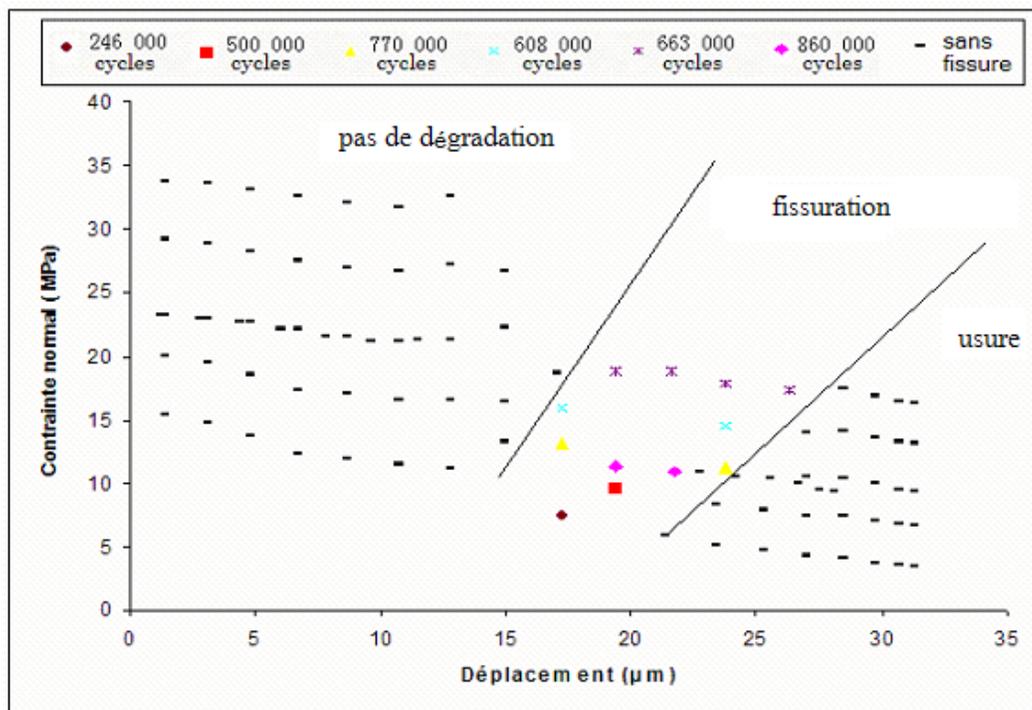


Figure 5.2 Carte du Réponse du Matériau (CRM) pour les essais de fretting fatigue sur des éprouvettes avec un trou central.

Sur la figure 5.2, la zone où il n'y a pas de dégradation correspond aux angles entre 0° et 40° . Dans cette zone, la contrainte normale est importante par rapport à autres zones, mais le déplacement est très petit. Le type de glissement entre deux faces de contact est

un glissement partiel et n'introduit pas d'endommagement significatif sur la surface de l'éprouvette comme l'indique figure 5.3.

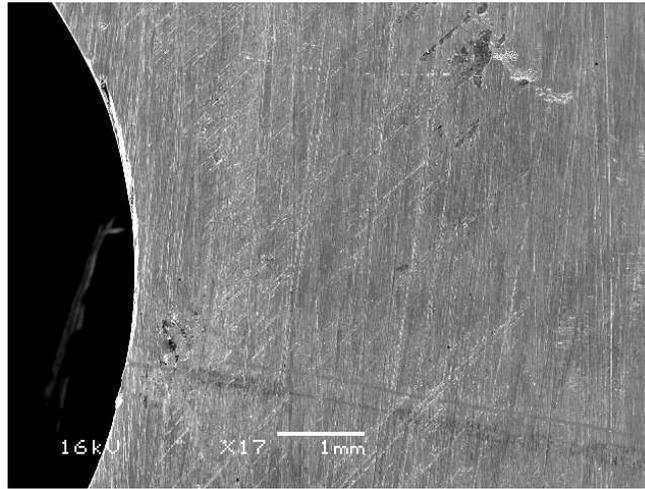


Figure 5.3 Zone où il n'y a pas de dégradation (0° - 40° de θ) pour l'essai de 12kN.

La zone où il y a fissuration correspond aux angles entre 40° et 60° à la frontière du contact comme l'indique figure 5.4. Dans cette zone, le glissement entre les faces en contact est un glissement mixte. La contrainte normale et le déplacement ont des valeurs moyennes. Ce glissement mixte introduit un endommagement sur la surface du contact de l'éprouvette. La fissure s'amorce dans cette zone. Le contact ne génère pas beaucoup de débris.

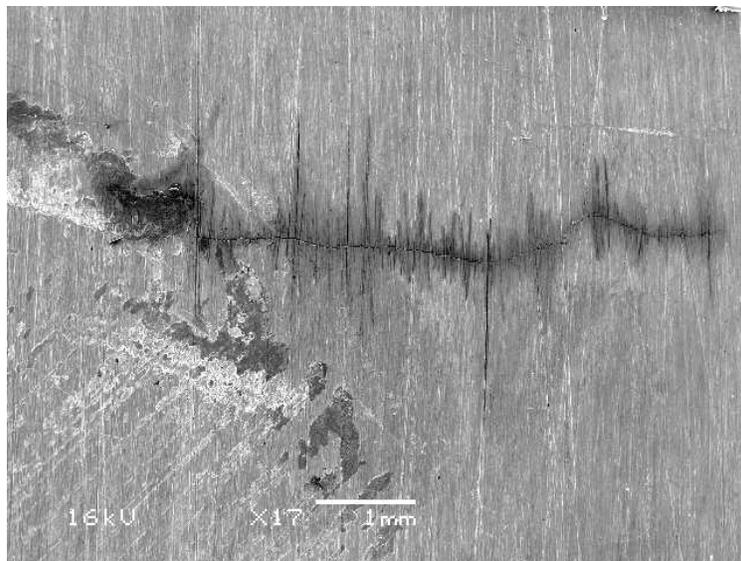


Figure 5.4 Zone de fissuration ($\theta = 40^{\circ}$ - 60°) pour l'essai de 12kN.

La zone d'usure correspond les angles entre 60° et 90° à la frontière du contact comme l'indique la figure 5.5. Dans cette zone, la valeur de contrainte normale est la plus faible, par contre le déplacement relatif est plus important. Le glissement est un glissement total. Ce glissement introduit un endommagement très significatif. Au voisinage de la frontière du contact, il y a enlèvement de matière et ensuite la formation de débris du glissement. Mais la formation des débris d'usure protège la surface du contact de l'éprouvette peut jouer le rôle de lubrifiant et empêcher l'amorçage de la fissure.

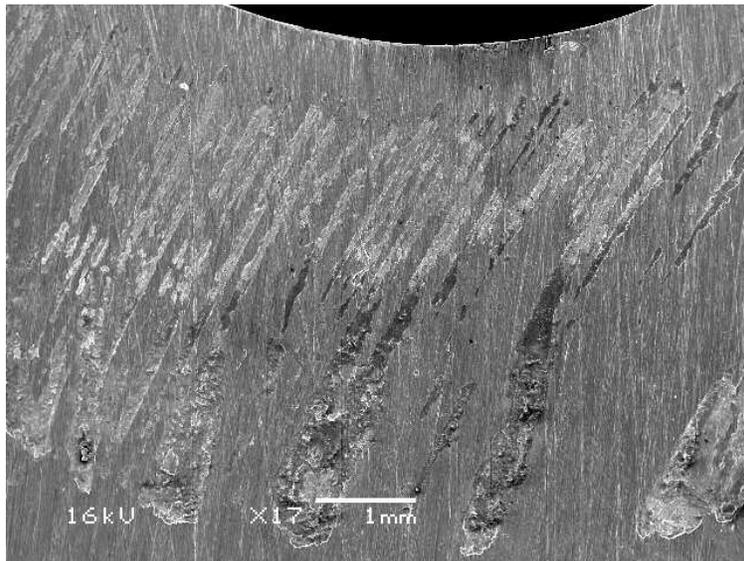


Figure 5.5 Zone d'usure ($\theta = 60^\circ$ - 90°) pour l'essai de 12kN.

Lors du chargement cyclique, la contrainte normale et le déplacement relatif sur la frontière du contact sont différents et dépendent de l'angle θ . Les fissures s'amorcent seulement dans la zone où il y a une combinaison du déplacement relatif et contrainte normale (déplacement de 15 à $30\mu\text{m}$ et contrainte normale de 20 à 10 MPa) qui se situent dans la zone de fissuration de la Carte du Réponse du Matériau (CRM). La Carte du Réponse du Matériau (CRM) peut donner des indications sur l'amorçage qui se situe à la frontière du contact avec un angle θ entre 40° et 60° .

Notons que dans la CRM, la largeur de la zone où il y a fissuration augmente avec l'augmentation de la contrainte normale. C'est-à-dire que la phase d'amorçage à la frontière du contact augmente et la tendance de multi- fissuration est plus importante.

5.2 Durée de vie

5.2.1 Durée de vie en fatigue avec un trou central

La figure 5.6 nous présente les courbes de Wöhler pour les essais de fatigue sur des éprouvettes avec un trou central et sans trou. La courbe de Wöhler correspondant à des essais sur des éprouvettes avec un trou est plus basse que celle sans trou, en effet il y a une concentration de contrainte au bord du trou. Avec la même durée de vie, la valeur de la contrainte pour le cas avec un trou est égale à la contrainte du cas sans trou diminuée d'une quantité $\Delta\sigma_{\text{eff}}$. Dans la figure 5.6, on peut voir les points correspondants aux valeurs des contraintes dans le cas sans trou de 200, 180, 160 et 140 MPa, on obtient la valeur de $\Delta\sigma_{\text{eff}}$ comme indiqué sur cette figure. Le tableau 5.2 montre que la contrainte effective du cas avec trou est diminuée de presque 50% (la valeur de K_t est environ 2). Par rapport au cas sans trou.

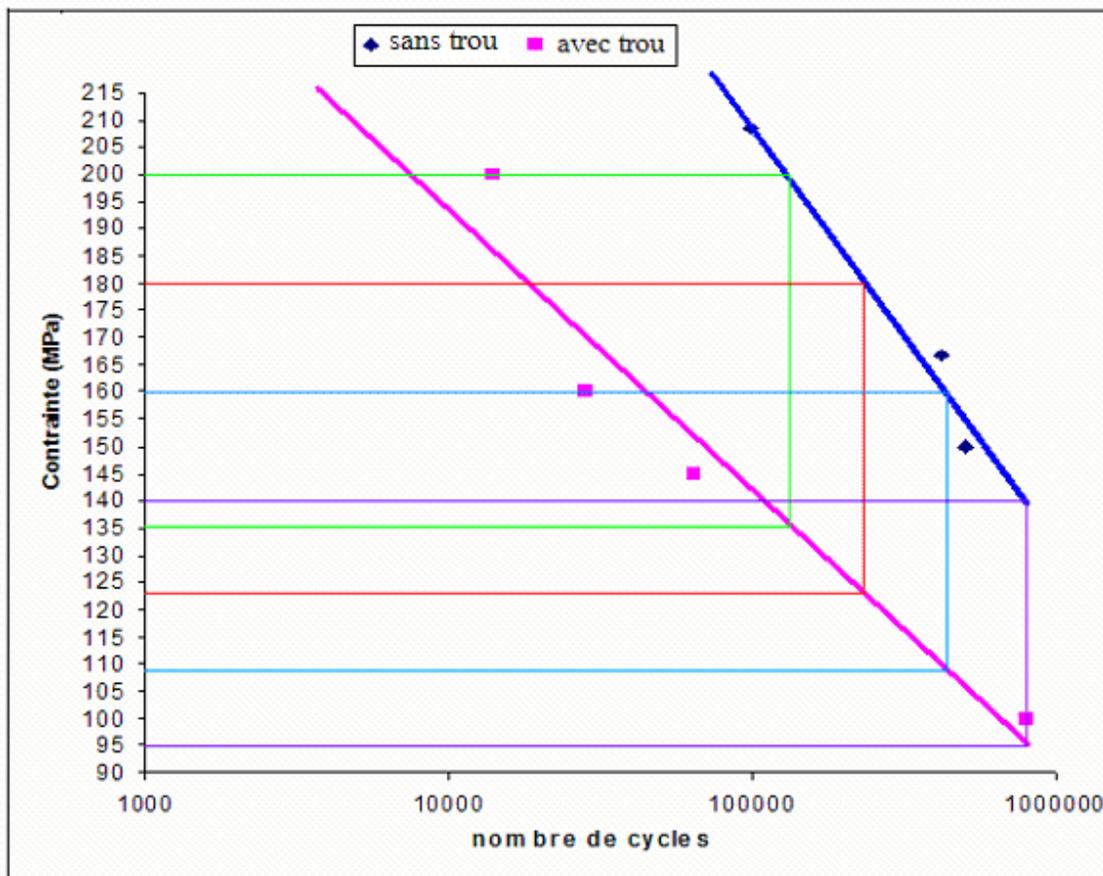


Figure 5.6 Courbes Wöhler pour les essais de fatigue avec un trou central et sans trou.

σ_{eff} sans trou (MPa)	σ_{eff} avec trou (MPa)	$\Delta\sigma_{\text{eff}}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{\text{eff}} / \sigma_{\text{eff}}$ avec trou (%)
200	135	65	48%
180	123	57	46%
160	109	51	47%
140	95	45	47%

Tableau 5.2 Amplitude de contrainte effective entre les courbes Wöhler des essais avec et sans trou.

5.2.2 Durée de vie en fretting fatigue

Pour les essais de fretting fatigue sur des éprouvettes avec et sans expansion, les résultats montrent que l'effort normal améliore la durée de vie comme l'indique la figure 5.7. Les essais sont réalisés avec la même valeur de la contrainte cyclique de 145 MPa, on remarque que a cause de bourrelets et polissage, l'expansion dans notre configuration n'a pas d'influence significative, car il n'y a pas d'amélioration de la durée de vie comme on peut l'observer dans le cas de la fatigue.

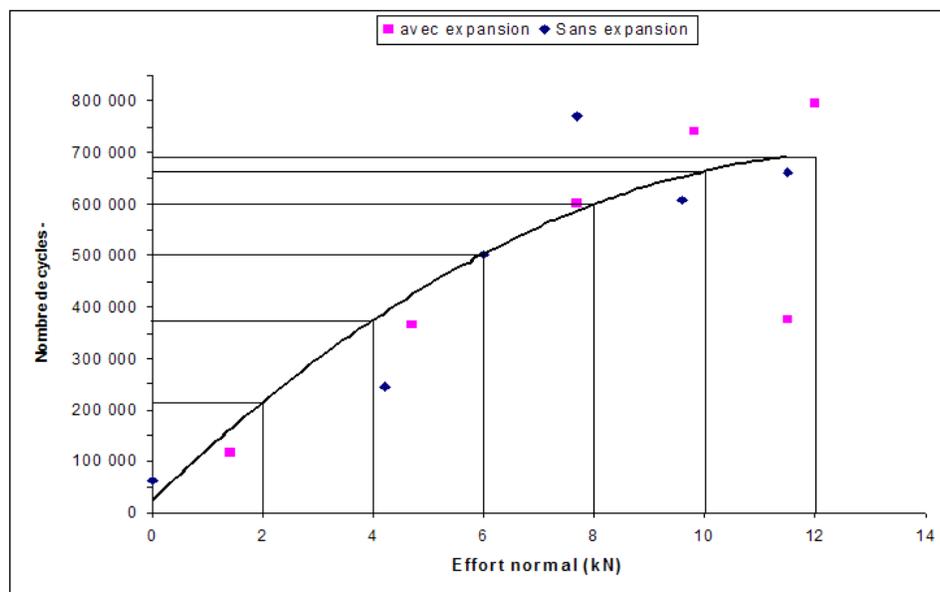


Figure 5.7 Evolution de la durée de vie en fonction de l'effort normal pour les essais de fretting fatigue avec et sans expansion.

La figure 5.8 correspond aux essais de fretting fatigue avec une contrainte cyclique de 130 et 145 MPa sur la courbe de Wöhler. Les valeurs de $\Delta\sigma_{eff}$ correspondent à la différence entre les valeurs de la contrainte cyclique avec les différents efforts normaux (cas du fretting fatigue) et celle sans efforts normaux (cas de fatigue) voir le tableau 5.3. Cette valeur augmente avec l'augmentation de l'effort normal. L'amélioration de la durée de vie induite par l'augmentation de l'effort normal semble dépendre de l'état des contraintes et des déformations ainsi que des conditions de contact.

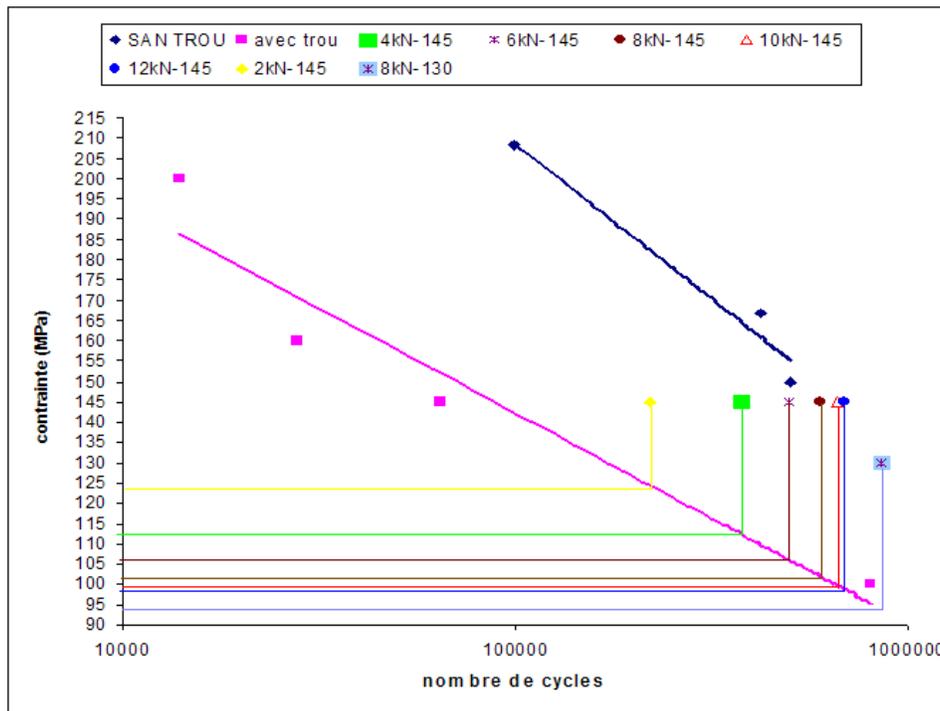


Figure 5.8 Courbe de Wöhler en fatigue et représentation des points en fretting fatigue.

Effort normal (kN)	2	4	6	8	10	12
Nombre de cycles	220 000	375 000	500 000	600 000	660 000	690 000
$\Delta\sigma_{eff}$ (MPa)	21	32	39	44	48	36
$\Delta\sigma_{eff}/\sigma_{eff}$ (100%)	14,5	22,1	26,9	30,3	31,7	33,1

Tableau 5.3 Les valeurs de $\Delta\sigma_{eff}$, $\Delta\sigma_{eff}$ correspondant aux différentes valeurs d'effort normal.

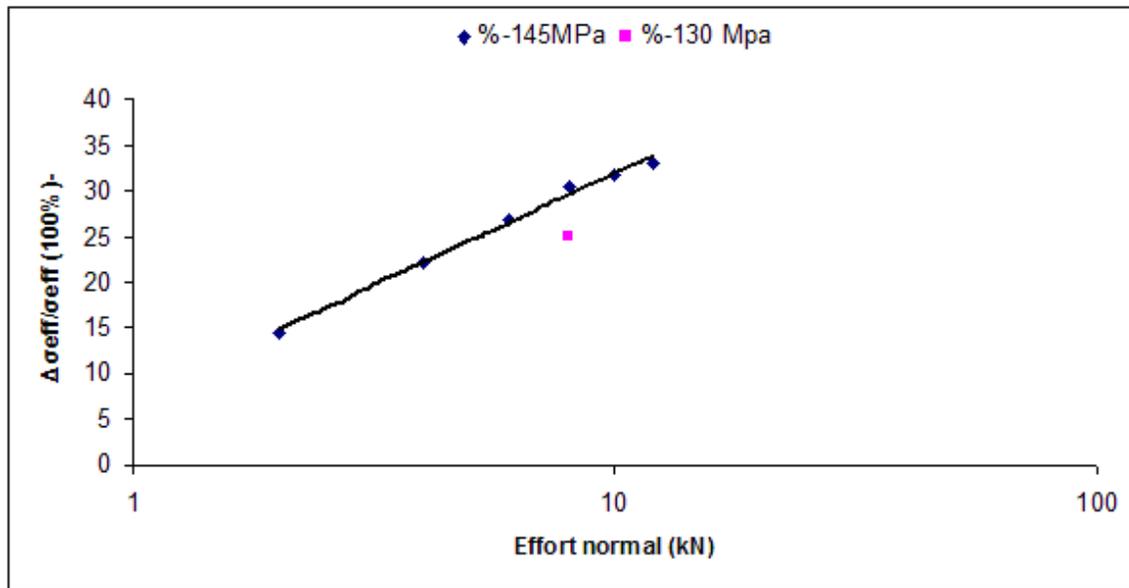


Figure 5.9 Evolution du rapport de $\Delta\sigma_{eff}/\sigma_{eff}$ (%) avec l'effort normal.

VI. CONCLUSION GENERALE

Les travaux présentés dans ce mémoire sont consacrés à l'étude du comportement en fretting fatigue des assemblages par rivetage et par boulonnage. Cette étude a été réalisée avec une investigation expérimentale sur des éprouvettes avec un trou central suivi ou non d'une expansion et sur des assemblages rivetés et boulonnés en « Alu – Acier ».

Dans cette investigation expérimentale, nous avons mis au point une pièce jouant le rôle de capteur avec deux jauges pour suivre l'évolution de l'effort normal, deux autres jauges pour donner des informations sur l'amorçage et le contact. Nous avons mis au point le dispositif LABVIEW pour suivre l'évolution des différentes jauges. Cette investigation expérimentale nous permet de traiter l'influence des paramètres tel que le coefficient de frottement, l'effort normal « la pression de Hertz » sur la durée de vie.

Des observations micrographiques au MEB ont été réalisées sur les différents échantillons. Ces observations nous ont permis d'avoir une analyse quantitative sur les sites d'amorçage de fissures ainsi que sur leur propagation.

Utilisation de la méthode des éléments finis avec le code ANSYS afin de déterminer les champs des contraintes et des déformations ainsi que des déplacements pour identifier leur influence sur les sites d'amorçage de fissure.

Dans notre configuration, l'ensemble de ce travail nous emmène à apporter les conclusions suivantes et des questionnements qui restent ouverts :

L'expansion du trou n'améliore pas la durée de vie sur des éprouvettes avec un trou central. Ceci est dû vraisemblablement à l'opération de polissage après expansion «opération nécessaire pour éliminer le bourrelet » qui a pour conséquence la relaxation des contraintes résiduelles.

L'augmentation de l'effort normal « pression de Hertz » jusqu'à une certaine valeur (12 kN dans notre cas), augmente la durée de vie. Cette augmentation est très marquée jusqu'à 8 kN et se stabilise après cette valeur.

L'augmentation du coefficient de frottement induit une diminution de la durée de vie. Il semble que la surface de contact diminue fortement « aire de contact réelle » avec l'augmentation du coefficient de frottement ceci est dû à la rugosité. Ce constat nous

emmène à émettre l'hypothèse que la diminution de l'aire de contact nous rapprochera des conditions de fatigue sans contact.

Les sites d'amorçage sont situés sur une zone proche de la frontière de contact qui est localisée avec un angle entre 40 et 60° par rapport à l'axe horizontal du trou. Ceci est dû à la combinaison de l'effet des contraintes et des déplacements.

Dans la zone de contact (qui a une forme de couronne), la densité des marques de frottement est plus élevée dans la zone avec un angle $\theta = 90^\circ$ (direction de la charge cyclique) que celle avec un angle $\theta = 0^\circ$. Quand l'angle $\theta = 0^\circ$ (direction perpendiculaire à la direction de la charge cyclique) la densité est plus faible (presque pas d'endommagement). La densité des marques de frottement est plus marquée vers la frontière de contact que sur le bord du trou.

L'augmentation de l'effort normal induit une augmentation de la densité de marques de frottement ainsi que la profondeur de celles-ci.

En combinant le calcul aux éléments finis en terme de déplacements et contraintes et les résultats expérimentaux (les sites d'amorçage), nous avons établi une Carte de Réponse du Matériau qui est représentée par l'évolution de l'effort normal en fonction du déplacement (par analogie à l'usure et le fretting). Dans cette carte, trois phases sont identifiées. La phase où il y a absence de dégradation, la phase de fissuration, et la phase d'usure.

Dans la Carte de Réponse du Matériau, notons que pour la même valeur de déplacement, l'augmentation de la valeur de la contrainte normale peut faire évoluer les conditions de fretting de la phase de fissuration à la phase de non endommagement. Ceci peut expliquer l'augmentation de la durée de vie en fretting fatigue dans notre cas pour une charge cyclique constante.

La durée de vie en fretting fatigue est plus élevée que celle en fatigue. Avec la même contrainte cyclique de 145 MPa, l'augmentation de la valeur de l'effort normal de 0 à 12 kN, fait croître la durée de vie de 64000 cycles à 700000cycles.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] N.K.Ramakrishna Naidu, S.Ganesh Sundara Raman
Effect of shot blasting on plain fatigue and fretting fatigue behaviour of Al–Mg–Si alloy AA6061, *International Journal of Fatigue* 27, 323-331: 2004
- [2] K. Elleuch, S. Fouvry, Ph. Kapsa
Fretting maps for anodised aluminium alloys, *Thin Solid Films* 426, 271–280: 2003
- [3] H. Proudhon
Identification des Mécanismes de Fissuration dans Un Alliage D'aluminium Sollicité en Fretting et en Fatigue, Thèse de doctorat, Ecole doctorale matériaux de Lyon : 2005
- [4] O. Vingsbo, S. Söderberg,
On fretting maps, *Wear* 126, 131-147:1988
- [5] Vincent, L.
Material and fretting. ESIS 18, Mechanical Engineering Publication, London, 323-337: 1994.
- [6] S.Fouvry, P.Kapsa, L. Vincent
Quantification of fretting damage, *Wear* 200, 186-205: 1996,
- [7] Blanchard, P., Colombie, C., Pellerin, V., Fayeulle, S., & Vincent, L.
Material effects in fretting wear: application to iron, titanium, and aluminium alloys. *Metallurgical transactions A*, 22A, 1535-1543 : 1991
- [8] Khaled Elleuch
Comportement en fretting d'alliages d'aluminium – effet de l'anodisation, Figure 76, Thèse de doctorat, L'Ecole Centrale de Lyon, France : 2002

- [9] Zhou, Z. R., & Vincent, L.
Cracking induced by fretting of aluminium-alloys. *Journal of tribology transactions of the ASME*, 119, 36-42: 1997
- [10] R. D. Mindlin
Compliance of elastic bodies in contact, *Journal of Applied Mechanics*, 16, 259-268: 1949
- [11] R. D. Mindlin, H. Deresiewicz
Elastic spheres in contact under varying oblique forces, *Journal of Applied Mechanics*, vol 20, 327-344: 1953
- [12] S. Fouvry, K. Elleuch, G. Simeon
Prediction of crack initiation under partial slip fretting conditions, *Journal of strain analysis*, v 6. 549-564: 2002
- [13] C. D. Lykins, S. Mall, V. K. Jain
Combined experimental-numerical investigation of fretting fatigue crack initiation, *International Journal of Fatigue*, 23 , 703-711: 2001.
- [14] H. Proudhon, S. Fouvry, J.-Y. Buffière
A fretting crack initiation prediction taking into account the surface roughness and the crack nucleation process volume, *International Journal of Fatigue* 27, 569–579:2005
- [15] E. Sauger, S. Fouvry b, L. Ponsonnet, Ph. Kapsa, J.M. Martin, L. Vincent
Tribologically transformed structure in fretting, *Wear* 245, 39–52:2000
- [16] Z. R. Zhou, S. R. Gu and L. Vincent
An investigation of the fretting wear of two aluminium alloys, *Tribology International*, 30,1-7: 1997

- [17] P. Reybet Degat, Z. R. Zhou, L. Vincent
Effet of chromic acid anodizing treatment on fretting behaviour during fretting tests on pre-stressed specimens, *Thin Solid Films* 298, 170-176: 1997
- [18] Hyukjae Lee, Shankear Mall
Fretting behavior of shot peened Ti-6Al-4V under slip controlled mode, *Wear* 260, 642-651:2005
- [19] I. R. McColl, S. J. Harris, Q. Hu, G. J. Spurr, P. A. Wood
Influence of surface and heat treatment on the fretting wear of an aluminium alloy reinforced with SiC particles, *Wear* 203-204, 507-515:1997
- [20] Z. R. Zhou, M. Fiest, A. Cardou, L. Cloutier, S. Goudreau
Effect of lubricant in electrical conductor fretting fatigue, *Wear* 189, 51-57 :1995
- [21] Zhou, Z. R., Fayeulle, S., & Vincent, L.
Cracking behaviour of various aluminium alloys during fretting wear. *Wear* 155, 317-330 :1992.
- [22] Beard J.
Palliatives for fretting fatigue. In: Waterhouse RB, Lindley TC, editors. *Fretting fatigue*, ESIS 18. London: Mechanical Engineering Publications, 419-436: 1994
- [23] Claude Bathias, Jean-Paul Bailon
La fatigue des matériaux et des structures, 2^e ed. Paris : Hermès, 1997. p14-82
- [24] Man SU
Etude de l'influence et de l'optimisation du degré d'expansion à froid dans les mécanismes de réamorçage d'une fissure : étude numérique et expérimentale, Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologie de Lille, France, p53 :2005

- [25] D. Nowell, D. Dini, D. A. Hills
Recent developments in the understanding of fretting fatigue, *Engineering Fracture Mechanics* 73, 207-222: 2006
- [26] Carlos Navarro, Jaime Dominguez
Initiation criteria in fretting fatigue with spherical contact, *International Journal of Fatigue* 26, 1253-1262 :2006
- [27] Sachin R. Shinde, David W. Hoepfner
Fretting fatigue behavior in 7075-T6 aluminium alloy , *Wear* 261, 426-434: 2006
- [28] Lamacq, V.
Amorçage et propagation de fissures de fatigue sous condition de fretting. Thèse de doctorat, INSA LYON, France: 1997
- [29] Dubourg, M. C., & Lamacq, V.
Stage II crack propagation direction determination under fretting fatigue loading : a new approach in accordance with experimental observations. *ASTM, STP 1367*, 436-450 : 2000
- [30] D. Nowell, D. Dini, D. A. Hills
Recent developments in the understanding of fretting fatigue
Engineering Fracture Mechanics 73 , 207-222: 2006
- [31] T. Hattori, M. Nakamura, T. Watanabe
Simulation of fretting – fatigue life by using stress-singularity parameters and fracture mechanics, *Tribology International* 36, 87-97: 2003
- [32] Giannakopoulos AE, Lindley TC, Suresh S.
Aspects of equivalence between contact mechanics and fracture mechanics : Theoretical connections and life-prediction methodology for fretting fatigue. *Acta Mater* 46, 2955-2968: 1998.

- [33] Giannakopoulos AE, Lindley TC, Suresh. S.
The role of adhesion in contact fatigue. *Acta Mater* 47, 4653-4664: 1998.
- [34] Sam Naboulsi
Applications of crack analogy to fretting fatigue, *Engineering Fracture Mechanics* 72,
1610-1623: 2005
- [35] Dini D. Hills DA.
International Journal Solids Structure 41 (24-25), 7049-7062: 2004
- [36] Nowell D, Araújo JA.
In: Ravichandran K S, Ritchie RO, Murakami Y, editors, *Small fatigue crack; mechanics, mechanisms, and application*, Oxford: Elsevier, 361-72:1999
- [37] Chan KS, Lee Y-D, Davidson DL, Hudak Jr SJ.
International Journal Fracture 112, 299-330:2001
- [38] N. K. Ramakrishana Naidu, S. Ganesh Sundara Raman
Effect of contact pressure on fretting fatigue behaviour of Al-Mg-Si alloy AA6601,
International journal of Fatigue 27, 283-291: 2005