

# Fissuration dans un joint soudé en alliages de Titane sous sollicitation multiaxiale

**M. Abecassis, A. Köster, V. Maurel**

MINES ParisTech, PSL Research University, MAT- Centre des matériaux, CNRS UMR 7633, BP  
87 91003 Evry, France  
manon.abecassis@mines-paristech.fr

## Résumé

*Cette étude vise à caractériser la vitesse de propagation de fissure en mode mixte (I+II) dans des alliages de titane assemblés par soudage laser. La démarche adoptée consiste à appliquer le même trajet de fissuration pour chaque alliage Ti17 et Ti6242 et une éprouvette bi-matériaux Ti17-Ti6242 soudée laser. Pour cela des éprouvettes en croix à entaille centrale sont utilisées avec une évolution du taux de biaxialité au cours de la propagation, de l'équibitraction vers le cisaillement. On met en évidence de fortes oscillations du front de fissure pour l'alliage Ti6242 et pour l'éprouvette soudée. Les vitesses de propagation sont les plus élevées dans l'éprouvette soudée et pour l'alliage Ti17.*

**Mots clés :** Fissuration, Ti17, Ti6242, soudage laser, sollicitations multiaxiales, mode mixte

## 1. Introduction

Le soudage est un des procédés d'assemblage les plus utilisés industriellement dès lors qu'il est nécessaire de réaliser une pièce avec deux matériaux différents, ou bien d'assembler deux pièces de géométries complexes entre elles. Le soudage modifie localement la microstructure, et est souvent le lieu privilégié d'amorçage et de propagation de fissures pouvant conduire à la rupture des pièces soumises à des chargements de fatigue. En considérant la propagation de fissure par fatigue dans un joint soudé, il est établi que sa microstructure a un impact sur le chemin de fissuration [1] : une fissure amorcée dans un joint en acier bi-matériaux peut bifurquer vers l'un des deux métaux de base [2]. D'autre part, la fissure peut présenter des bifurcations locales en se propageant dans le métal de base puis être rectiligne dans le joint soudé [3]. En outre, lorsque le chargement est multiaxial, il convient de connaître en fonction du matériau étudié, l'influence de la multiaxialité du chargement sur la vitesse de propagation de fissure [4]. En présence d'une soudure, ce point est rarement étudié alors même que la combinaison d'un matériau hétérogène et d'un chargement complexe peut influencer le trajet de fissuration comme la vitesse de propagation de cette fissure de fatigue [5].

L'objectif de cette étude est de déterminer le trajet de fissuration et la vitesse de propagation de fissure dans un joint soudé laser bi-matériaux en alliage de Titane Ti17-Ti6242 sous sollicitation biaxiale coplanaire. On s'intéressera notamment à l'influence du gradient de microstructure entre cordon de soudure et métal de base. La méthodologie repose sur la qualification de la propagation pour un chargement biaxial coplanaire à l'aide d'une éprouvette en croix pour deux alliages de titane (Ti17 et Ti6242) puis sur une éprouvette soudée à partir de ces deux alliages.

## 2. Matériaux et mise en œuvre

### 2.1 Alliages étudiés et joint soudé

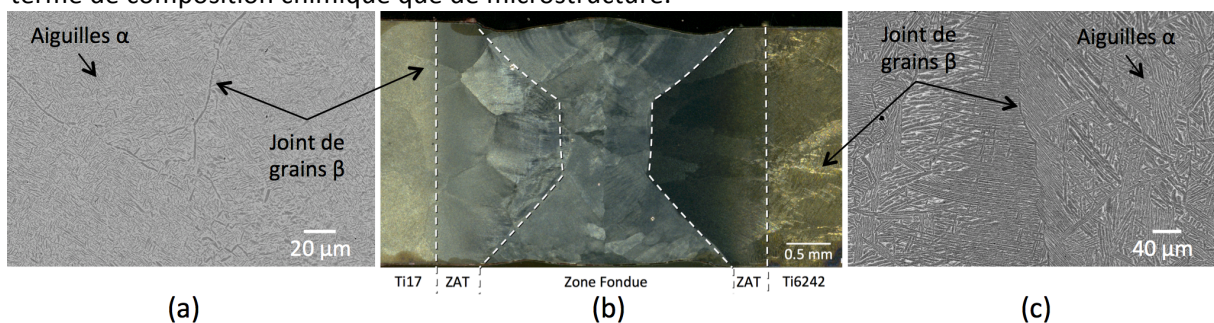
Les alliages de titane Ti17 et Ti6242 présentent des différences de composition (Table 1)

mais aussi de microstructure. Ils sont constitués de grains  $\beta$  primaires de tailles millimétriques – de 1 à 2 mm pour Ti17 (Figure 1(a)) et de 2 à 3 mm pour Ti6242 (Figure 1(c)) avec des colonies d'aiguilles  $\alpha$ , qui sont plus fines (inférieur à 5  $\mu\text{m}$ ) dans le Ti17 que celles dans le Ti6242 (environ 10  $\mu\text{m}$ ) (Figure 1 (a) et (c) respectivement).

Alliage	Al	Sn	Zr	Mo	Cr	O	Si
Ti17	4,5-5,5	1,6-2,4	1,6-2,4	3,5-4,5	3,5-4,5	0,08-0,13	-
Ti6242	5,5-6,5	1,8-2,2	3,6-4,4	1,8-2,2	-	Max 0,15	0,06-0,1

**Table 1.** Compositions chimiques en %wt des alliages de titane Ti17 et Ti6242

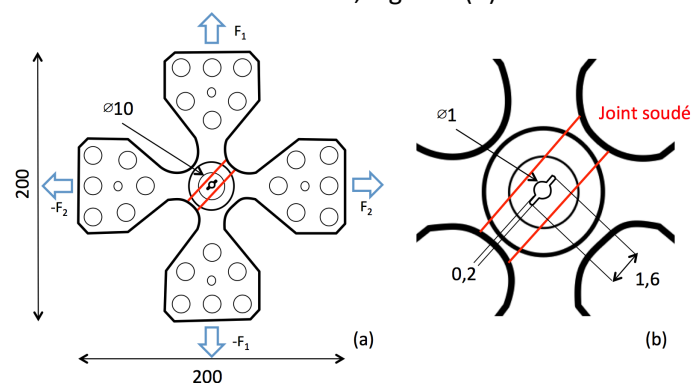
Une vue en coupe d'un joint soudé permet de mettre en évidence trois zones (Figure 1 (b)) : la zone fondue (due à la mise en fusion des métaux de base à leur jonction), les métaux de base (loin du joint soudé) et une zone de transition entre les deux premières : la zone affectée thermiquement (ZAT) créée par conduction thermique. Du fait de l'hétérogénéité des microstructures et de compositions entre les deux métaux de base, le joint soudé est une zone de transition aussi bien en terme de composition chimique que de microstructure.



**Figure 1.** Observation de microstructure : (a) au MEB en mode rétro-diffusé de l'alliage Ti17 ;(b) au microscope optique du joint soudé et (c) au MEB en mode rétro-diffusé de l'alliage Ti6242

## 2.2 Méthodologie expérimentale

Afin de soumettre le joint soudé à une sollicitation biaxiale coplanaire, les éprouvettes utilisées sont en forme de croix, dont l'épaisseur de la zone utile est réduite pour y maximiser les contraintes, Figure 2(a). Une entaille centrale est réalisée par électroérosion à fil dans la direction d'une bissectrice de l'angle entre les deux axes de chargement, Figure 2(b). Pour les éprouvettes soudées, le joint soudé est également orienté parallèlement à l'une des bissectrices de l'éprouvette et l'entaille est réalisée dans cette même direction, Figure 2(b).



**Figure 2.** Epreuve biaxiale : (a) géométrie globale et (b) détail de la zone utile

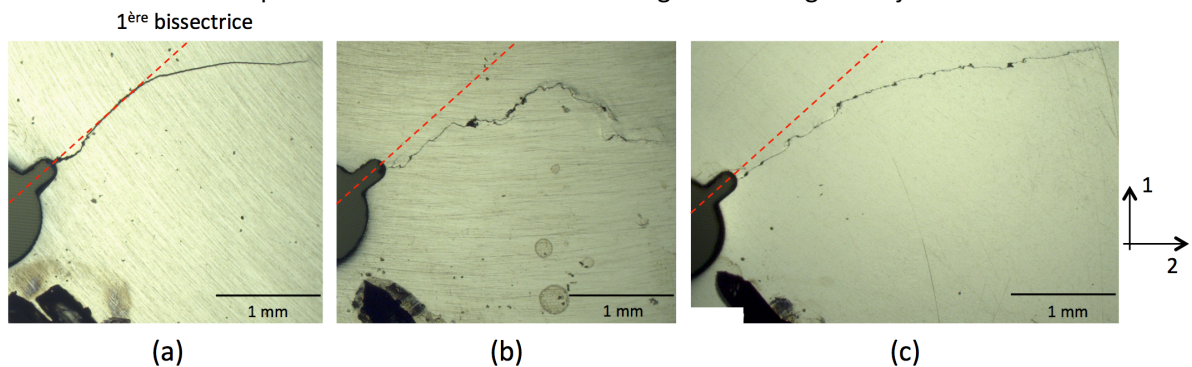
On réalise des essais de fatigue à effort imposé, les efforts appliqués sur les deux axes de l'éprouvette sont de forme sinusoïdale, de fréquence 1 Hz pour un rapport de charge  $R=0,1$ . Le taux de biaxialité du chargement  $T$  est défini comme le rapport entre la charge maximale selon l'axe 2 et la charge maximale selon l'axe 1 :

$$T = \frac{F_2}{F_1}$$

Afin de caractériser la propagation de fissure dans le joint soudé et dans la zone de transition, les essais sont effectués en trois phases de chargement : i) initiation de fissure et propagation en équilibrage ( $T=1$ ), ii) bifurcation de fissure progressive, avec diminution par paliers successifs de la charge sur l'axe 2 de l'éprouvette ( $T=0,9$  puis  $T=0,8$  puis  $T=0,7$ ) et iii) propagation de fissure en condition de cisaillement ( $T=0,7$ ). Chacune de ces trois phases correspond à une longueur de propagation de fissure identique pour les trois configurations de matériaux testées : une de chaque alliage Ti17 et Ti6242 et une soudée. Pour l'éprouvette soudée, ces deux dernières étapes conduisent à ce que les deux branches de la fissure se propagent respectivement vers les métaux de base Ti17 et Ti6242. On peut ainsi étudier d'une part le comportement de la fissure au travers du gradient de microstructure (de la soudure vers le matériau de base) ainsi que sa propagation sous cisaillement macroscopique dans chaque métal de base. Les fissures ont été observées *in situ* à l'aide d'un microscope optique Keyence VHX 1000. La mesure de fissure  $a$  correspond à la moyenne des mesures curvilignes de la longueur de fissure pour les deux branches de la fissure, comprenant la longueur d'entaille  $a_0$  (i.e.  $a=a_0+\Delta a$ , où  $\Delta a$  correspond à l'incrément de fissure).

### 3. Longueur et vitesse de propagation d'une fissure sous chargement biaxial

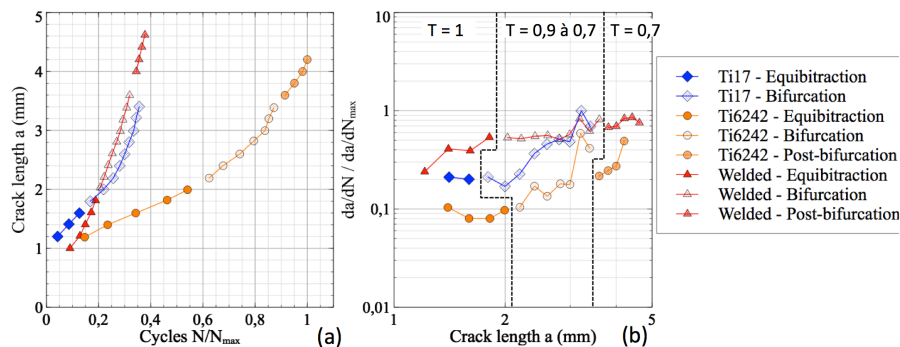
L'observation des fissures (Figure 3) dans les différentes éprouvettes permet de mettre en évidence l'influence du matériau sur la bifurcation. L'angle de bifurcation est clairement plus important pour l'alliage Ti6242 (Figure 3(b)) que pour Ti17 (Figure 3(a)). En outre, la fissure dans l'alliage Ti6242 présente de nombreuses bifurcations locales (sur des distances de l'ordre de 100  $\mu\text{m}$ ) alors que pour Ti17 le chemin est très régulier tout au long de la propagation. Dans l'éprouvette soudée, l'angle de bifurcation est faible mais des bifurcations locales sont observées sur l'ensemble du chemin de fissuration vers le métal de base Ti6242. Pour l'alliage Ti6242, les bifurcations locales ont déjà été mises en évidence dans la littérature [6] et sont probablement associées à une fissuration influencée par l'orientation des colonies d'aiguilles le long du trajet de fissuration.



**Figure 3.** Observation optique *in situ* des fissures dans (a) l'alliage de titane Ti17, (b) l'alliage de titane Ti6242 et (c) dans l'éprouvette soudée. La ligne pointillée indique la direction de la bissectrice choisie pour la direction d'entaille et de la zone soudée pour l'éprouvette soudée.

L'évolution de la longueur de fissure curviligne en fonction du nombre de cycles relatif ( $N/N_{\text{max}}$  où  $N_{\text{max}}$  correspond au nombre de cycles maximal pour l'essai le plus long) est représentée sur la Figure 4(a). La fissuration la plus rapide a lieu pour l'alliage Ti17 par rapport à l'alliage Ti6242. Pour l'éprouvette soudée, le temps d'initiation est plus important que pour Ti17 en chargement d'équilibrage. En revanche, on constate que pour des fissures longues (ici pour  $a > 2$  mm), c'est cette éprouvette soudée qui conduit à la durée de propagation la plus courte. L'étude de la vitesse de fissuration permet de mettre en évidence une vitesse quasi-constante dans la zone d'équilibrage pour les alliages Ti17 et Ti6242, ainsi qu'une accélération de la vitesse à la fin de l'étape de bifurcation, Figure 4(b). Pour l'éprouvette soudée, la vitesse augmente de manière similaire dans l'étape d'équilibrage et de bifurcation. Lors du passage à l'étape de propagation post-bifurcation, la vitesse diminue brusquement comme observé sur les deux autres éprouvettes. Ce saut de vitesse en fin de bifurcation est le plus important pour Ti6242 : la fissure a légèrement bifurqué puis s'est

remise à propager dans la direction de la 1<sup>ère</sup> bissectrice, puis lors du 3<sup>ème</sup> palier la fissure a bifurqué brusquement à 90° (Figure 3(b)) conduisant au saut de vitesse observé (Figure 4(b)).



**Figure 4.** Evolution (a) des longueurs de fissure curvilignes et (b) des vitesses associées dans les alliages Ti17 et Ti6242, et dans l'éprouvette soudée. Les lignes pointillées (b) indiquent les transitions entre phases de chargement détaillées dans le texte

## 4. Conclusion

En conclusion, nous avons mis en évidence les éléments suivants pour les conditions testées:

- La fissuration en fatigue dans l'alliage Ti6242 conduit à des bifurcations locales très prononcées; le chemin de fissuration est moins perturbé pour l'alliage Ti17; pour l'éprouvette soudée bi-matériaux, la zone soudée présente quelques oscillations locales d'amplitudes plus faibles que pour Ti6242 alors que la fissure se propage vers la zone du métal de base Ti6242 ;
- La vitesse de fissuration est plus rapide dans Ti17 que dans Ti6242 quel que soit le taux de biaxialité ; la vitesse de fissuration dans l'éprouvette soudée est plus rapide que pour les deux alliages testés sur l'ensemble de l'essai;

Les bifurcations locales semblent permettre le ralentissement de la fissure pour l'alliage Ti6242. A plus grande échelle, au cours de la bifurcation quel que soit le matériau testé, on constate un ralentissement de la vitesse de propagation. Pour comprendre les mécanismes à l'œuvre pour les alliages de Titane et dans le cas de la soudure, une analyse métallurgique est en cours et permettra d'analyser quel(s) élément(s) de microstructure participe(nt) aux micro-bifurcations. Enfin, la modélisation de la géométrie réelle de la fissure permettra d'évaluer les facteurs d'intensité des contraintes réels en mode I, II et III pour l'ensemble de l'essai.

## Remerciements

Stéphane Pierret et Sébastien Rix (Safran Aircraft Engines) sont grandement remerciés pour avoir fourni les matériaux, ainsi que Vladimir Esin (Mines ParisTech) pour son aide précieuse pour l'étude de la microstructure des matériaux.

## Références

- [1] R. O. Ritchie, (1988). Mechanisms of fatigue crack propagation in metals, ceramics and composites: role of crack tip shielding. *Materials Science and Engineering: A*, 103(1), 15-28.
- [2] H. T. Wang, G. Z. Wang, F. Z. Xuan, S. T. Tu, (2013). An experimental investigation of local fracture resistance and crack growth paths in a dissimilar metal welded joint. *Materials&Design*, 44, 179-189.
- [3] A. Trudel, M. Lévesque, M. Brochu, (2014). Microstructural effects on the fatigue crack growth resistance of a stainless steel CA6NM weld. *Engineering Fracture Mechanics*, 115, 60-72.
- [4] M. W. Brown, K. J. Miller, (1985). Mode I fatigue crack growth under biaxial stress at room and elevated temperature. In *Multiaxial fatigue*. ASTM International.
- [5] M. Abecassis, A. Köster, V. Maurel, (2016). Short and long crack growth behavior of welded ferritic stainless steel. *Procedia Structural Integrity*, 2, 3515-3522.
- [6] H. Ghonem, (2010). Microstructure and fatigue crack growth mechanisms in high temperature titanium alloys. *International Journal of Fatigue*, 32(9), 1448-1460.