



**HAL**  
open science

## Essai de fissuration à chaud en soudage TIG sur un alliage d'aluminium 6061

Aurélie Niel, Cyril Bordreuil, Frédéric Deschaux-Beaume, Gilles Fras

► **To cite this version:**

Aurélie Niel, Cyril Bordreuil, Frédéric Deschaux-Beaume, Gilles Fras. Essai de fissuration à chaud en soudage TIG sur un alliage d'aluminium 6061. 16ème Colloque National de la Recherche en IUT, Jun 2010, Angers, France. 9p. hal-00807959

**HAL Id: hal-00807959**

**<https://hal.science/hal-00807959>**

Submitted on 4 Apr 2013

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

---

# **Essai de fissuration à chaud en soudage TIG sur un alliage d'aluminium 6061.**

**Aurélie Niel \*, Cyril Bordreuil \*, Frédéric Deschaux-Beaume \*, Gilles Fras \***

*\* Laboratoire de Mécanique et Génie Civil - LMGC UMR 5508, Université de Montpellier II, 34095 MONTPELLIER cedex, France*

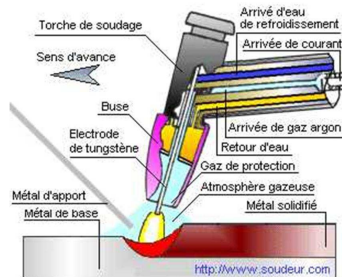
**Sections de rattachement : 60**  
**Secteur : secondaire**

*RÉSUMÉ. Le soudage est une technique d'assemblage de pièces très développée dans l'industrie. Compte tenu des exigences actuelles du marché, les industriels cherchent à repousser les limites des procédés. En vue d'accroître la productivité, diminuer les coûts tout en garantissant la qualité des pièces. L'augmentation de la vitesse de soudage entraîne de nombreux défauts, dont la fissuration à chaud. Plusieurs études ont été faites à ce sujet. Toutefois, la compréhension de ce phénomène est un problème complexe faisant intervenir le procédé, le matériau et le chargement mécanique. Les méthodes expérimentales d'investigation de ce défaut [Cartaud1995] sont nombreuses, mais ces essais s'avèrent souvent difficiles à interpréter et surtout à comparer. Nous développons un nouvel essai consistant à appliquer une précontrainte de traction contrôlée dans la direction de soudage sur une tôle d'alliage d'aluminium 6061 de faible épaisseur, avant de réaliser une ligne de fusion avec le procédé TIG. Cet essai permet l'initiation de fissures en régime de soudage établi, au sein de la zone pâteuse où des mécanismes complexes de solidification sont mis en jeu. Le document présentera le soudage et le phénomène de fissuration à chaud. Ensuite, une méthode de caractérisation de la fissuration à chaud en soudage par des mesures couplées sera développée en vue d'établir un critère de sensibilité [Rappaz1999].*

*MOTS-CLÉS : soudage; fissuration à chaud ; alliage d'aluminium.*

## 1. Introduction au soudage

L'opération de soudage peut être assimilée à une opération de fusion locale donnant à la pièce une nouvelle structure cristalline, cette structure dépendant des conditions de soudage et des métaux d'apport. En soudage, on observe un très fort gradient thermique dans la pièce dû à un apport très localisé de chaleur.



*Figure 1. Soudage TIG.*

Le terme 'TIG' est l'abréviation de 'Tungsten Inert Gas' et désigne le procédé de soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode de tungstène aussi appelée 'GTAW' (gaz tungsten arc welding). Le procédé de soudage TIG consiste à créer un arc entre l'extrémité d'une électrode réfractaire (tungstène) et la pièce à souder et à provoquer ainsi la fusion du métal de base. Les différents éléments participant au soudage sont décrits dans la figure 1.

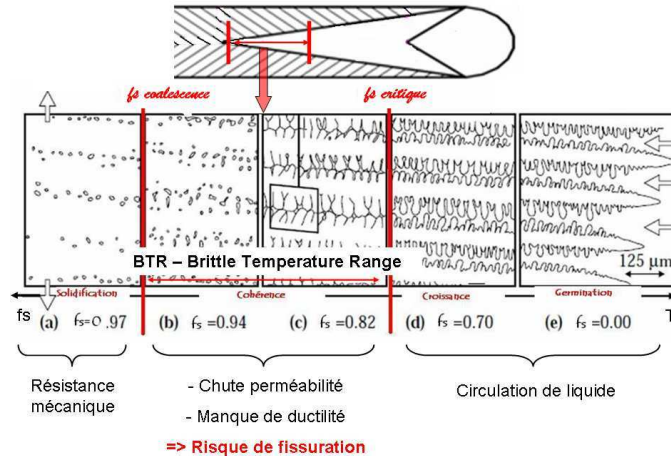
De nombreuses études ont donc été menées pour limiter les défauts tout en augmentant la productivité. Ce document présente le phénomène de fissuration à chaud en soudage. Ensuite, un nouvel essai, simple et original, sera présenté. L'analyse des résultats expérimentaux sera faite. Pour finir une validation numérique de l'essai sera présentée.

## 2. La fissuration à chaud

Le soudage, comme tous les autres procédés où il y a solidification de l'alliage, est très sensible à la fissuration à chaud. De nombreux paramètres sont à prendre en compte pour limiter les risques de fissuration, comme la vitesse de refroidissement ou encore la composition de l'alliage. Ce paragraphe décrit les mécanismes d'apparition de la fissuration ainsi que les facteurs influents.

La solidification correspond à un changement d'état, du liquide au solide. La structure du matériau est définie par les conditions de solidification. La zone pâteuse correspond à la coexistence de la phase liquide et de la phase solide. Les bornes de

l'intervalle de solidification correspondent à la température de liquidus et de solidus du matériau.



**Figure 2.** Evolution de la solidification au cours du soudage.

La structure évolue en 4 étapes successives, figure 2, pour atteindre l'état solide [Rappaz].

- la germination: des particules solides germent alors dans une grande quantité de liquide. Le matériau se comporte comme un fluide visqueux sans tenue en traction.
- la croissance : la fraction solide croît progressivement et la température tend vers le solidus. En soudage, le gradient thermique étant très important, le front de solidification (interface liquide solide) est de type dendritique.
- la cohésion: la fraction solide commence à être élevée. Les dendrites entrent en contact les unes avec les autres et forment un squelette solide cohérent. La chute de la perméabilité alors observée est due à la formation d'un réseau solide de plus en plus dense. De fins films liquides subsistent entre les grains solides et subissent de fortes déformations.
- la solidification : la fraction solide tend vers 1 et les dernières poches de liquide se solidifient. Le réseau solide peut alors résister aux déformations. La contrainte et la déformation à rupture (de la zone pâteuse) augmentent rapidement.

Les sollicitations mécaniques subies par le squelette pendant la solidification sont dues à trois types de phénomènes, thermiques et mécaniques.

- la contraction de solidification due au changement de phase liquide/solide.
- la contraction thermique du squelette solide déjà formé.
- les déformations provenant des contraintes extérieures.

L'intervalle de fragilité (Brittle Temperature Range ou BTR) est défini comme étant l'intervalle de température correspondant aux fractions solides où la microstructure est en configuration critique. Les bornes du BTR correspondent respectivement à la température où la fraction de solide est telle que le liquide ne peut plus circuler à cause de la perte de perméabilité ( $f_{critique}$ ) et à la température où la fraction de solide est suffisante pour que la résistance mécanique augmente grâce au nombre de ponts solides formés (au-delà de  $f_{coalescence}$  mais inférieur à 1).

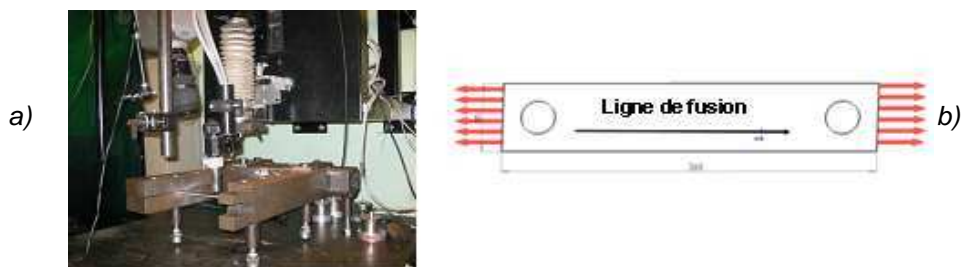
De plus, le gradient thermique de soudage étant très élevé, Fabrègue a proposé de choisir la fraction solide critique de 0,7 environ (au lieu de 0,9 en fonderie) pour un alliage d'aluminium. Ainsi en soudage, la zone pâteuse est plus large ce qui induit un risque de fissuration plus important [Fabrègue1994].

### 3. Essais de fissuration à chaud

La compréhension de ce phénomène est un problème complexe faisant intervenir une forte interaction entre le procédé, le matériau et le chargement mécanique. Les méthodes expérimentales d'investigation de ce défaut [Cartaud1995] sont nombreuses, mais il s'avère souvent difficile d'interpréter les paramètres influant sur l'initiation.

Un essai original a donc été développé pour promouvoir l'initiation de la fissure grâce à une sollicitation simple. Il consiste à appliquer une précontrainte de traction contrôlée dans la direction de soudage, avant de réaliser une ligne de fusion avec le procédé « TIG », figure 3b. Le banc d'essai de fissuration à chaud, figure 3a, est mis sur deux axes mobiles (X, Y) de table. Lors d'un essai, la torche de soudage est dans une position fixe et le banc est en mouvement de translation longitudinale à vitesse constante.

Les tôles sont de faible épaisseur ( $< 3\text{mm}$ ) et les échantillons, découpés grâce à une machine jet d'eau, sont de dimensions  $265 \times 50\text{mm}^2$ .



**Figure 3.** a) Banc d'essai, b) Schéma de l'essai et de la sollicitation.

Six vitesses de soudage, comprises entre [5 mm/s ; 20mm/s], ont été étudiées. Quatre essais ont été réalisés pour chaque vitesses en faisant varier l'intensité de soudage dans la gamme [130 A ; 260 A]. Les gammes de vitesse et d'intensité de soudage choisies, pour cette étude, sont élevées pour le procédé TIG.

Dans ce test, le contrôle de la microstructure est possible en ajustant l'intensité et la vitesse de soudage ainsi que les dimensions des échantillons. Dans cette étude, les dimensions et l'épaisseur de la tôle (3mm) sont constantes, seuls les paramètres de soudage varient. Le chargement mécanique est contrôlé par les paramètres de soudage et par la précontrainte appliquée. Au total, 24 échantillons ont été étudiés avec des paramètres de soudage variables et une précontrainte fixe de 200 MPA (0.8 mm de déplacement). Des essais avec et sans précontrainte ont été réalisés mais ne seront pas présentés dans cette étude.

Cet essai simple a pour but d'analyser l'influence du procédé sur la microstructure et sur le chargement mécanique global. Rappelons que les facteurs influents sur la fissuration à chaud en soudage sont : la vitesse et l'intensité de soudage, les éléments d'alliages, la sollicitation mécanique. Les résultats quantitatifs étudiés sont : le nombre de fissures obtenus, la largeur des fissures et leur position dans le cordon. Un paramètre qualitatif sera ensuite étudié à l'aide d'un critère de fissuration à chaud.

Cet essai permet l'initiation de fissure en régime quasi stationnaire, au sein de la zone pâteuse où des mécanismes complexes de solidification sont mis en jeu. L'initiation de la fissure se fait transversalement en bord de cordon, puis se propage longitudinalement le long de la ligne centrale, représentée en figure 4.



**Figure 4** Fissure obtenue après l'essai.

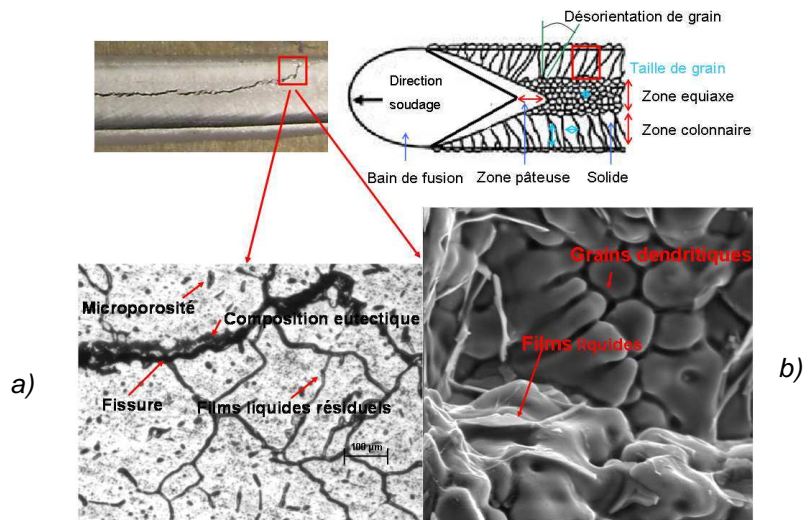
#### **4. Analyses expérimentales**

Les facies de rupture sont observés à l'aide d'un microscope, macroscope et d'un MEB. Avec nos conditions de soudage, la fissure s'initie toujours au bord de la zone fondue et de manière transverse à la direction de soudage.

Les observations au macroscope, figure 5a, montrent que les fissures sont inter dendritique. La présence de films liquides en fin de solidification est visible sur le facies de rupture étudié au MEB, figure 5b.

Des longueurs caractéristiques sont mesurées dans le but d'identifier l'influence des paramètres de soudage sur la solidification et sur l'initiation de fissure. Aux fortes vitesses de soudage, l'interaction thermique/métallurgique donne une

microstructure dendritique de type colonnaire sur les bords du bain et équiaxe au centre du cordon. La proportion de chacune des deux zones est fonction des paramètres de soudage et influe sur la sensibilité à la propagation de la fissure.



**Figure 5.** Analyses : a) Microscope \*100 ; b) MEB \*2100.

En effet, plus la zone équiaxe est large par rapport à la zone colonnaire, plus la fissure aura du mal à se propager au centre du cordon. En moyenne, sur les essais fissurants, on retrouve une zone dendritique colonnaire d'environ 1500 µm sur les bords du cordon et une zone dendritique équiaxe au centre d'environ 2000 µm.

La désorientation entre les grains est aussi un paramètre important à prendre en compte dans l'étude du phénomène. En effet, une forte désorientation entre deux grains limite l'arrivée du liquide en pied de dendrites. La décohésion de deux grains ne pourra donc pas être guérie par une alimentation en liquide résiduel. Toutefois, après observation des fissures, on ne note pas de corrélation entre la position des fissures et la forte désorientation entre grains.

L'influence de la morphologie des grains et leurs tailles a été étudiée. Dans nos gammes de vitesse et d'intensité, les fissures s'initient toujours entre les grains colonnaires. Conformément à la littérature qui monte une sensibilité accrue à la fissuration à chaud des grains dendritiques colonnaires par rapport à celle des grains équiaxes. En effet, la circulation du liquide en fin de solidification est plus difficile entre les grains colonnaires.

Le chargement mécanique vient se joindre à une microstructure sensible pour favoriser l'initiation de fissure. En effet, le retrait du métal qui tend à se solidifier dans le BTR ainsi que la précontrainte imposée par l'essai viennent solliciter les grains colonnaires dans le sens de l'ouverture. Ces fissures sont donc à la fois liées à la

métallurgie par une microstructure sensible et à l'état de contraintes résultant du cycle de soudage. Une prédiction intrinsèque de l'initiation des fissures devra donc prendre en compte l'influence des morphologies induites lors de la solidification ainsi que le chargement mécanique à l'échelle de la pièce.



**Figure 6** Images issues des vidéos in situ.

Des analyses par ressuage ont été faites sur l'ensemble des échantillons. Différents modes de ruptures ont pu être identifiés. Les essais à forte vitesse et forte intensité montrent une fissure transverse qui se propage rapidement en fissure longitudinale (de 6000  $\mu\text{m}$  de largeur en moyenne). Or, lorsque les vitesses sont moins élevées, on observe une succession de fines fissures transverses (moins de 30  $\mu\text{m}$  de largeur) n'atteignant pas la zone équiaxe centrale.

A ces différentes analyses, des observations in situ de l'initiation de fissure ont été faites. Ces vidéos ont été faites à l'aide d'une caméra rapide, à 1000 images par seconde, qui est installée au dessus du cordon. Après divers réglages, notamment pour améliorer la luminosité et la protection gazeuse, la croissance des grains ainsi que la propagation de la fissure ont pu être observées. Sur la figure 6, deux images extraites des vidéos sont présentées. Sur ces images, la délimitation du bain de fusion est clairement visible. Ces vidéos permettent de mieux appréhender le phénomène de fissuration à chaud en soudage. L'initiation de la fissure se fait bien en bord de cordon, toutefois, il reste difficile de situer cette fissure vis-à-vis de l'intervalle de fragilité.

La non homogénéité du chargement thermique ainsi que la non linéarité du comportement mécanique du matériau rendent la compréhension du phénomène complexe. C'est pourquoi nous avons choisi de faire une modélisation simple de l'essai développé afin de mieux comprendre l'influence de la précontrainte sur l'initiation de fissure.



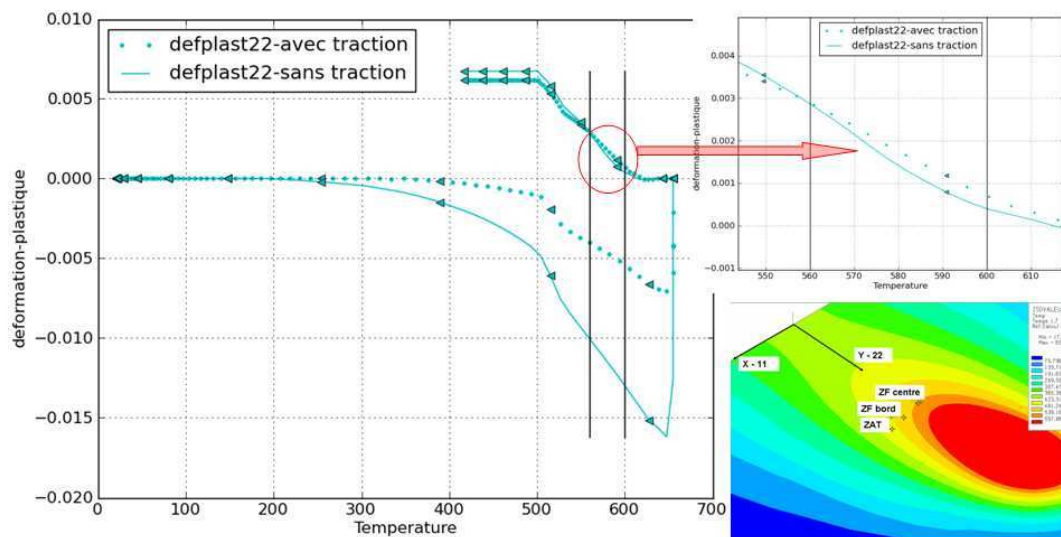
## 5. Validation numérique

La modélisation thermomécanique et métallurgique de l'essai est de grand intérêt pour étudier les sollicitations dans la zone pâteuse. Au cours d'une opération de soudage, les phénomènes physiques peuvent être répertoriés en trois catégories:

- Thermique: source de chaleur, chaleur latente, conduction et convection;
- Métallurgique: dilatations thermiques, changements de microstructure;
- Mécanique: déformations et contraintes résiduelles induites lors du soudage.

Le matériau, alliage d'aluminium 6061, a choisi d'être en accord avec la partie expérimentale de l'étude. Le maillage, grossier autour du cordon, a été raffiné dans la zone fondue. La source de chaleur, de type gaussienne, de rayon 3,5 mm dont l'intensité maximale est de 100 W/mm<sup>2</sup> a été modélisée. Cette source se déplace à une vitesse de 15 mm/s. Les pertes par convection et rayonnement sont pris en compte. Toutes propriétés thermiques et mécaniques sont considérées comme dépendantes de la température. Un comportement élasto plastique avec un écrouissage mixte est pris en compte [Maisonnette].

La simulation permet d'étudier l'ensemble des sollicitations thermiques et mécaniques subies lors d'un cycle de soudage. Des pistes d'amélioration de procédé pourront ensuite être étudiées pour limiter ces sollicitations dans le but de réduire l'initiation de fissure. Toutefois, cet étude ne portera que sur l'analyse de l'influence de la précontrainte de traction sur la sensibilité à la fissuration à chaud.



**Figure 7** Evolution de la déformation plastique longitudinale.

Deux cas sont étudiés ici: le premier, soumis à une contrainte de traction longitudinale, et le second sans. L'évolution de déformation plastique suivant y, en figure 7, est montrée en fonction du cycle thermique.

L'histoire mécanique du nœud situé au bord du cordon en zone fondue est étudiée. En effet, expérimentalement nous avons observé que la fissure s'initiait toujours au bord de la zone fondue et se propager ensuite au centre. Or dans cette étude, nous portons l'intérêt sur les conditions d'initiation de fissure et non de propagation. L'intervalle de fragilité est délimité par deux droites noires, et correspond à notre zone d'intérêt. La déformation longitudinale de l'essai avec traction est 30 % supérieure à celle sans traction dans le BTR. On peut donc en déduire que l'essai développé aura tendance à favoriser l'ouverture de fissure.

## **6. Conclusion et perspectives**

La fissuration à chaud est un problème à multiples facettes, avec de nombreuses interactions entre le procédé, le matériau et le chargement mécanique. Un grand nombre d'études ont été faites sur la fissuration à chaud, mais peu ont étudié la relation entre le chargement mécanique, induite par le cycle thermique, et la microstructure. Le but de l'essai était de développer un test simple et utilisable dans l'industrie. Il permet ainsi d'analyser les conditions d'initiations de fissure en fonction des paramètres de soudage, du matériau et de précontrainte appliquée.

Actuellement, l'application d'un critère d'initiation de fissure est à l'étude. Ce critère permettra de montrer la sensibilité de l'essai à la fissuration à chaud en fonction de différents paramètres. Ces paramètres seront d'ordre mécanique, par l'introduction des vitesses de déformation de la zone pâteuse, mais aussi métallurgique (et donc liés aux conditions de soudage) par l'introduction de grandeurs microstructurales. Des voies d'optimisation du procédé de soudage sont à envisager pour diminuer le risque de fissuration malgré les fortes vitesses de soudage.

## **7. Bibliographie**

Cartaud, «Essais de fissuration à chaud», STC, vol. 49, No 9-10, 1995.

Fabrégue, « Microstructure et fissuration à chaud lors du soudage laser d'alliages », Thèses, INPG, 2004.

Rappaz, Drezet, Gremaud, «A new hot tearing criterion», Metallurgical and materials transactions A, 30A, 449, 1999.

Maisonnette, « Influences mécaniques et métallurgiques de procédés haute température sur un alliage d'aluminium 6061-T6 », Thèses, INSA Lyon, 2010.