



HAL
open science

Une approche intégrée pour l'étude de la résistance des Assemblages acier/aluminium par procédés laser et TIG

Guillaume Sierra, Patrice Peyre, Frédéric Deschaux-Beaume, David Stuart,
Cyril Bordreuil, Gilles Fras, Bertrand Wattrisse

► To cite this version:

Guillaume Sierra, Patrice Peyre, Frédéric Deschaux-Beaume, David Stuart, Cyril Bordreuil, et al.. Une approche intégrée pour l'étude de la résistance des Assemblages acier/aluminium par procédés laser et TIG. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. hal-03360450

HAL Id: hal-03360450

<https://hal.science/hal-03360450>

Submitted on 30 Sep 2021

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.

Approche intégrée pour l'étude de la résistance des assemblages acier/aluminium par procédés laser et TIG

Guillaume Sierra^{1, 2}, Patrice Peyre³, Frédéric Deschaux-Beaume², David Stuart³, Cyril Bordreuil², Gilles Fras², Bertrand Wattrisse²

¹CEA/DRT/LITEN/GERAILP, 16 b avenue Prieur de la Côte d'Or, 94114 Arcueil, France

²Laboratoire de Mécanique et Génie Civil, UMR 5508 CNRS, Université. Montpellier II, CC 048 Place Eugène Bataillon Montpellier, 34095, France

³Laboratoire pour l'Application des Lasers de Puissance, UPR 1578 CNRS, 16 b avenue Prieur de la Côte d'Or, 94114 Arcueil, France
sierra@iut-nimes.fr

Résumé :

L'assemblage hétérogène acier/aluminium réalisé par les procédés laser et TIG est étudié par une approche intégrant les aspects procédé, matériau et mécanique afin d'en optimiser la tenue mécanique. La résistance mécanique des assemblages évaluée principalement par un essai de traction-cisaillement est fortement influencée par la configuration de l'assemblage (aspect mécanique), les caractéristiques de la liaison intermétallique qui assure la liaison (aspect procédé-matériau) mais également par les modifications des propriétés mécaniques des matériaux entraînées par l'opération de chauffage (aspect procédé-mécanique). On montre donc que la prise en compte des effets procédé-matériau-mécanique est nécessaire pour déterminer et optimiser la tenue mécanique de ces assemblages.

Abstract :

The steel to aluminium joining by laser and TIG processes is studied by an integrated approach which involves process, material and mechanical aspects in order to optimize the mechanical strength of the assemblies. The strength measurement of the assemblies, mainly evaluated by a tensile-shear test is strongly influenced by the assembly structure (mechanical aspect), the parameters of the intermetallic layer which ensures the joining (process-material aspect) but also by the modification of the mechanical properties in the whole assembly (process-mechanics aspect). It is shown that taking into account the process-material-mechanics effects, one can determine and optimize the mechanical strength of such assemblies.

Mots-clés : assemblage ; hétérogène ; intermétallique.

1 Introduction

Afin de respecter les futures normes anti-pollution visant à réduire les émissions de CO₂ dans l'atmosphère, les constructeurs automobiles envisagent de diminuer la masse des véhicules en remplaçant certains composants en acier par de l'aluminium. Pour atteindre ce but, il est nécessaire d'envisager des liaisons hétérogènes acier/aluminium.

Deux modes d'interaction ont été étudiés pour la réalisation de l'assemblage hétérogène, une interaction entre l'acier solide et l'aluminium liquide ou une interaction à l'état liquide des deux matériaux. Parmi ces deux modes d'interaction, c'est la réaction entre l'acier solide et l'aluminium liquide, ou mouillage réactif qui a été la plus étudiée.

Initialement, cette interaction a été mise en œuvre par Miller *et al.* (1956) en soudage à l'arc TIG. Plus récemment, Wagner *et al.* (2001), puis Peyre *et al.* (2007) ont étudié ce mode d'interaction par faisceau laser. Suivant le même mode d'interaction, un fil d'apport peut être utilisé afin de limiter l'apport d'énergie à l'assemblage. Wagner *et al.* (2001) puis Sierra (2006) ont utilisé un fil d'apport 4047 (Al-Si). En utilisant de l'acier galvanisé, Mathieu *et al.* (2007)

ont montré qu'un alliage Zn-Al pouvait également conférer de bonnes propriétés mécaniques aux assemblages.

Dans ce travail, on propose d'analyser les facteurs qui influencent la tenue mécanique de ces assemblages. La résistance mécanique dépend de différents paramètres comme la géométrie de l'assemblage, les matériaux mis en jeu, la modification des propriétés matériaux en fonction de la température et les modes de sollicitation.

Dans une première partie on détaillera les procédés d'assemblage, avant de présenter les différentes interactions procédé - matériau et matériau - mécanique. Cette étude semble montrer qu'il est indispensable d'intégrer l'ensemble des paramètres intervenant au cours de la réalisation de l'assemblage pour pouvoir en optimiser la tenue mécanique.

2 Matériaux et conditions expérimentales

2.1 Matériaux

L'acier retenu pour cette étude est l'acier bas carbone DC 04 (0,08 % m. C, 0,40 % m. Mn), défini par la norme européenne EN 10130. Cet acier a été utilisé à l'état galvanisé (épaisseur de zinc de 10 μ m), et non galvanisé. Un alliage d'aluminium 6016-T4 (0,90-1,50 % m. Si, 0,20-0,60 % m. Mg, 0,25 % m. Cu) a été utilisé dans cette étude. Les propriétés mécaniques des alliages sont reportées en tableau 1.

	$\sigma_{0,2}$ (MPa)	σ_R (MPa)	ϵ (%)
DC 04	160	280	40
6016-T4	140	260	27

TAB. 1 – Propriétés mécaniques des matériaux.

Un flux de brasage Nocolok[®] est utilisé afin d'éliminer la couche d'alumine présente à la surface de l'aluminium et permettre la réaction entre l'acier solide et l'aluminium liquide.

2.2 Conditions expérimentales

En vue de l'application industrielle de l'assemblage acier/aluminium et de son positionnement dans une structure réelle, l'accès peut être limité soit à la tôle d'acier, soit à la tôle d'aluminium.

2.2.1 Assemblage laser

L'assemblage par faisceau laser est réalisé à l'aide d'une source laser à onde continue TRUMPF HL4006 de puissance maximale 4 kW. Une configuration à clin a été retenue pour laquelle le faisceau laser est dirigé exclusivement sur la tôle d'aluminium positionnée sur celle d'acier (FIG. 1a).

Dans cette configuration un système de bridage statique ou dynamique peut être utilisé afin de maintenir un contact permanent entre les deux tôles.

L'assemblage ainsi réalisé est schématisé FIG. 1b, avec les zones caractéristiques mentionnées. A ce stade, il est intéressant de noter la taille, la forme et la localisation des différentes zones modifiées par le procédé (ZF, ZAT et Fe₂Al₅).

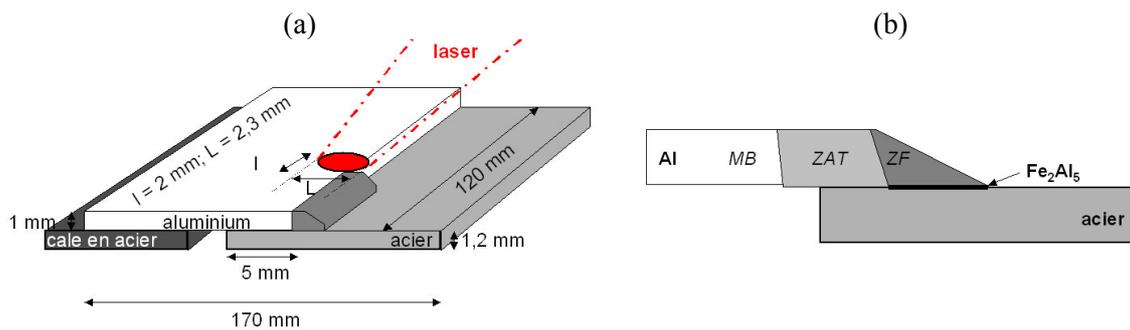


FIG. 1 – (a) configuration d'assemblage à clin et (b) représentation schématique des zones caractéristiques post-assemblage.

2.2.2 Assemblage TIG

Pour le procédé TIG, une configuration en transparence autorisant le chauffage côté acier a été retenue (FIG. 2a), identique à celle utilisée par Wagner *et al.* (2001) par faisceau laser. Cette configuration est plus pénalisante que la configuration à clin, en effet le contact thermique entre les tôles d'acier et d'aluminium et le système de bridage doit être parfaitement maîtrisé pour assurer la fusion de l'aluminium par conduction à travers l'acier. L'assemblage ainsi réalisé (FIG. 2b) montre la répartition géométrique des zones caractéristiques (ZF et ZAT) pour chacun des deux matériaux.

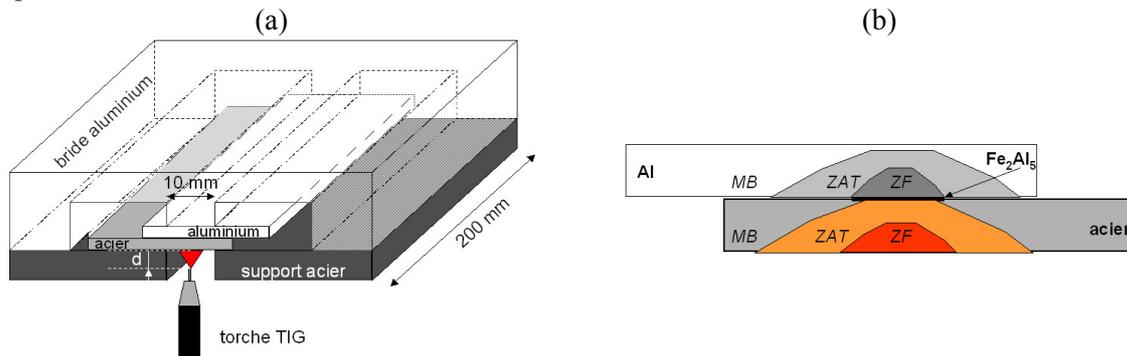


FIG. 2 – (a) configuration d'assemblage en transparence et (b) représentation schématique des zones caractéristiques post-assemblage.

3 Résultats et discussion

L'influence du procédé (configuration, énergie, pompage thermique...) sera discutée vis-à-vis de la tenue mécanique de l'assemblage à travers le lien procédé-matériau et matériau-mécanique.

3.1 Aspect procédé-matériau

Quels que soient la configuration étudiée (à clin ou en transparence), le procédé mis en œuvre (laser ou TIG) et la nature des matériaux mis en jeu lors de l'interaction (acier galvanisé ou non), la liaison entre l'acier et l'aluminium est assurée par une couche de réaction intermétallique composée majoritairement de la phase Fe₂Al₅. Cette phase se forme par une interaction entre l'acier solide et l'aluminium liquide. On s'intéresse alors aux propriétés intrinsèques de la couche (nature chimique, morphologie) et à ses caractéristiques (largeur et épaisseur) qui découlent du procédé.

Cette couche de réaction se développe ainsi sur une largeur équivalente à la largeur de la zone de fusion de l'aluminium, son épaisseur augmente avec l'énergie apportée à l'assemblage. On peut ainsi observer l'apparition de la fissuration de la couche (FIG.3a) pour les épaisseurs supérieures à 10 μm . Dans certains cas on observe également des détachements partiels de la couche de réaction (FIG.3b).

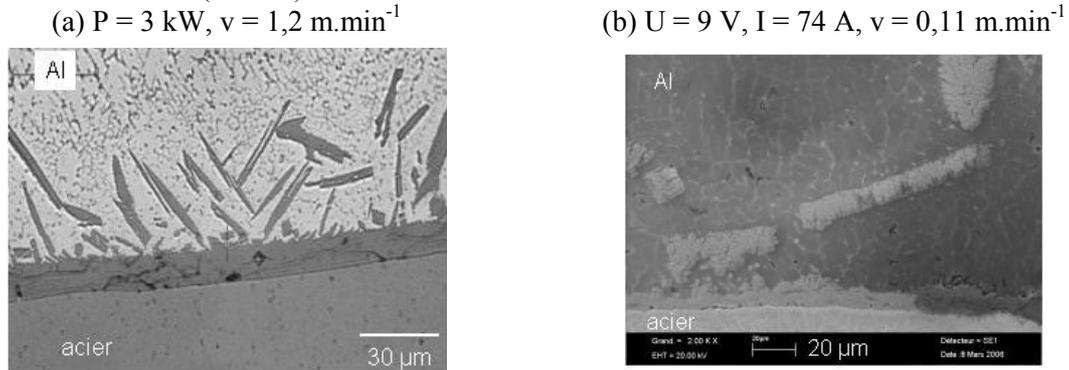


FIG. 3 – Comparaison de la morphologie des couches de réaction formées (a) lors d'une interaction laser acier/Al et (b) lors d'une interaction TIG acier/Al.

Ainsi, la dimension de la zone de fusion de l'aluminium (FIGS.1b et 2b), directement gouvernée par l'énergie de soudage et la configuration d'assemblage lors du procédé (conditions d'échange), conditionne la largeur de la couche de réaction, ainsi que son épaisseur. On voit alors l'intérêt qu'il y a à maîtriser l'apport d'énergie pour limiter l'épaisseur et éviter alors la fissuration des couches.

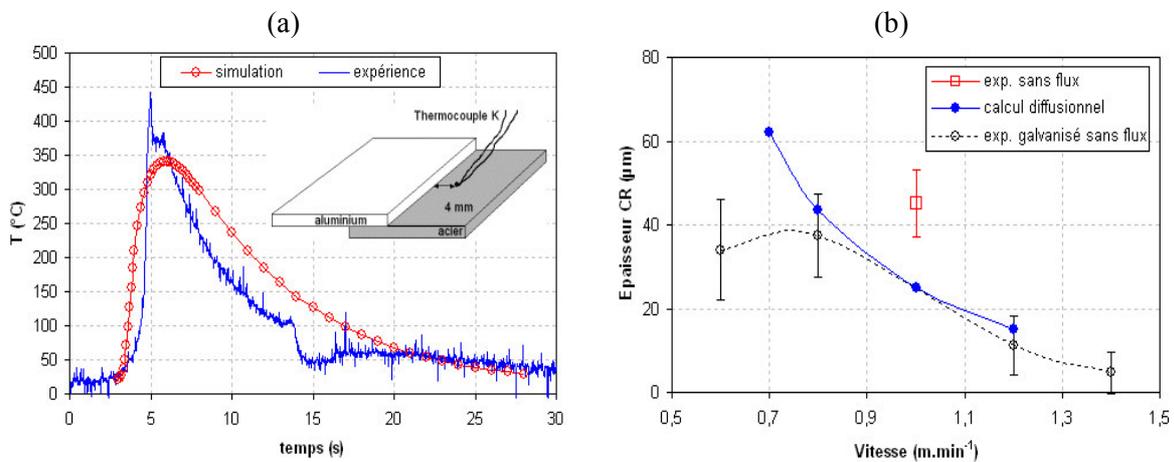


FIG. 4 – (a) cycles thermiques expérimentaux et simulés ($v = 0,7 \text{ m/min}$) et (b) comparaison expérience-simulation de l'épaisseur de la couche de réaction, cas de l'assemblage laser.

Il est alors intéressant de développer une modélisation permettant de relier les paramètres procédé (puissance laser ou tension et intensité TIG, et vitesse) aux paramètres caractéristiques de la couche. Cette modélisation thermique éléments finis est réalisée sous Sysweld[®]. Les simulations sont validées après comparaison des cycles thermiques expérimentaux (FIG.4a) et des dimensions des zones de fusion. Il convient de signaler la nécessité de modéliser l'ensemble du procédé d'assemblage (paramètres, bridage...) dans l'optique de pouvoir optimiser l'environnement une fois identifiées les caractéristiques importantes vis-à-vis de la tenue mécanique de l'assemblage.

Dans une seconde étape, les cycles thermiques interfaciaux, difficiles à mesurer expérimentalement sont calculés. On utilise ensuite le modèle de croissance déterminé par Bouayad et al. (2003) pour calculer l'épaisseur de la couche de réaction formée durant l'interaction anisotherme. La comparaison du calcul avec les mesures expérimentales (FIG.4b) montre un bon accord expérience-simulation dans le cas des assemblages réalisés sans flux de brasage sur acier galvanisé ou non-galvanisé.

On peut alors en utilisant ce modèle déterminer les paramètres procédé optimaux afin d'optimiser la largeur et l'épaisseur de l'interface.

Comme cela a déjà été souligné au paragraphe précédent, les modifications microstructurales induites par les différentes transformations métallurgiques activées par les cycles thermiques entraînent une modification des propriétés mécaniques des ZF et ZAT de l'acier et de l'aluminium. C'est dans ce but que des mesures de champ de déformation (Genevois *et al.* 2005) ont été réalisées sur l'aluminium puis sur l'acier séparés de l'assemblage par une rupture provoquée au niveau de la couche de réaction. Il est ainsi possible d'identifier la modification du comportement mécanique (FIG.6a) entraînée par chaque cycle thermique en chacun des points de l'assemblage.

3.2 Aspect matériau-mécanique

On observe deux types de rupture des assemblages hétérogènes avec localisation soit dans la couche de réaction, correspondant à une rupture interfaciale de nature fragile, soit une rupture dans la zone de fusion de l'aluminium avec une rupture ductile (FIG.5a). La compétition entre ces deux modes de rupture est gouvernée par la largeur de la couche de réaction (FIG.5b). Cependant, on a observé que la configuration de l'assemblage (à clin ou par transparence) modifiait le comportement à rupture de l'assemblage. Par exemple, la configuration en transparence est plus pénalisante puisqu'une largeur de couche de réaction de 8 mm est nécessaire à provoquer la rupture dans l'aluminium contre 3 mm pour une configuration à clin (Sierra 2006).

La rupture est pilotée par l'état de contrainte appliqué le long de l'interface acier/aluminium. L'état de contrainte dépendant de la géométrie des tôles, de la forme du cordon mais aussi du gradient de propriétés mécaniques montre l'importance de la prise en compte des interactions procédé-matériau et matériau-mécanique.

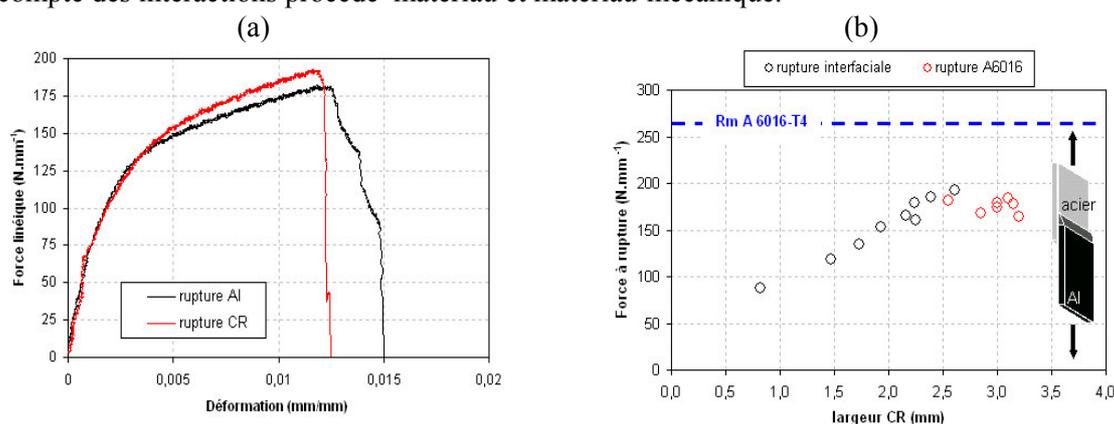


FIG. 5 – (a) courbes d'effort d'assemblages acier/Al avec rupture fragile de la couche de réaction et rupture ductile dans l'aluminium. (b) évolution de la force à rupture en fonction de la largeur de la couche de réaction. Cas de l'assemblage laser.

Si la rupture de l'interface est prédite, le comportement à rupture peut être identifié à l'aide d'un modèle numérique (FIG.6b). On peut par exemple déterminer le gradient de propriétés mécaniques le plus adapté (en modifiant les paramètres procédé) afin d'obtenir la meilleure tenue mécanique. Il est alors possible de modifier les conditions environnementales du procédé pour améliorer la tenue mécanique de l'assemblage.

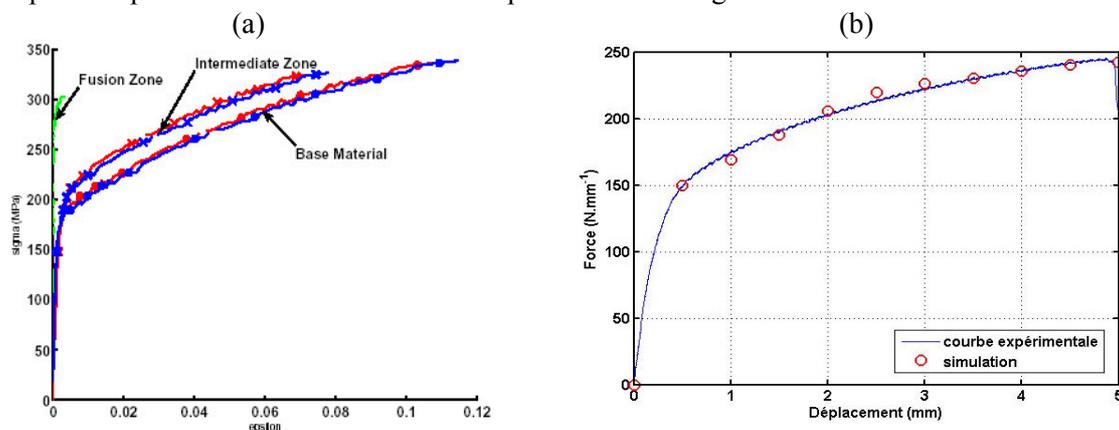


FIG. 6 – (a) comportement mécanique identifié par mesure de champ de déformation sur l'aluminium. (b) comparaison expérience - simulation d'un assemblage laser acier/Al.

4 Conclusions

Par l'approche intégrée ainsi mise en place, on est à tout moment capable de modifier le procédé afin d'optimiser le comportement mécanique de l'assemblage. On peut par exemple modifier le dépôt d'énergie afin d'élargir la couche de réaction tout en limitant son épaisseur maximale, ou alors modifier l'environnement de l'assemblage lors du procédé afin de limiter les cycles thermiques en différents points de la structure, ceci pour limiter les modifications de propriétés mécaniques.

Références

- Bouayad, A., Gerometta, C., Belkebir, A. & Ambari A. 2003 Kinetic interactions between solid iron and molten aluminium. *Mater. Sci. and Eng. A*, **363**, 53-61.
- Genevois, C., Deschamps, A., & Vacher, F. 2006 Comparative study on local and global mechanical properties of 2024 t351, 2024 t6 and 5251 o friction stir welds. *Mater. Sci. and Eng. A*, **415**, 162-170.
- Mathieu, A., Shabadi, R., Deschamps, A., Suéry, M., Mattéi, S., Grevey, D. Cicala, E. 2007 Dissimilar material joining using laser (aluminum to steel using zinc-based filler wire). *Opt. and Laser Tech.*, **28**, 762-773.
- Miller, M.A., Mason, E.W. 1956 Properties of arc-welded joints between aluminum and stainless steel, *Weld. J.* **35**, 323s-328s.
- Peyre, P., Sierra, G., Deschaux-Beaume, F., Stuart, D. & Frasn, G. 2007 Generation of aluminium-steel joints with laser-induced reactive wetting. *Mater. Sci. and Eng. A*, **444**, 327-338.
- Sierra, G. 2006 Etude métallurgique et mécanique de l'assemblage hétérogène acier/aluminium par les procédés laser et TIG, Thèse de doctorat, Université Montpellier II.
- Wagner, F., Zerner, I., Kreimeyer, M., Seefeld, T. & Sepold, G. 2001, Characterization and properties of dissimilar metal combinations of Fe/Al and Ti/Al-sheet materials, Proceedings of ICALEO'01, Jacksonville, USA.