



**HAL**  
open science

## Etude numérique et expérimentale de l'assemblage acier aluminium par soudo-brasage

Virgil Optasanu, Pierre Sallamand, Bruno Martin, Tony Montesin, Simone Mattei, Dominique Grevey

► **To cite this version:**

Virgil Optasanu, Pierre Sallamand, Bruno Martin, Tony Montesin, Simone Mattei, et al.. Etude numérique et expérimentale de l'assemblage acier aluminium par soudo-brasage. MATERIAUX 2006, Nov 2006, DIJON, France. hal-00416183

**HAL Id: hal-00416183**

**<https://hal.science/hal-00416183>**

Submitted on 12 Sep 2009

**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.

## Etude numérique et expérimentale de l'assemblage acier aluminium par soudo-brasage

V. Optasanu<sup>a</sup>, P. Sallamand<sup>b</sup>, B. Martin<sup>c</sup>, T. Montesin<sup>d</sup>, S. Mattei<sup>e</sup>, D. Grevey<sup>f</sup>

<sup>a</sup> LRMA, Université de Bourgogne, IUT Dijon, Bd Dr Petitjean, B.P. 17867 21078 Dijon Cedex  
virgil.optasanu@u-bourgogne.fr

<sup>b</sup> LTM, Université de Bourgogne, IUT Le Creusot, 12, Rue de la Fonderie 71200 Le Creusot  
pierre.sallamand@iutlecreusot.u-bourgogne.fr

<sup>c</sup> LTM, Université de Bourgogne, ISAT de Nevers, 49 rue Melle Bourgeois 58000 Nevers  
bmartin@u-bourgogne.fr

<sup>d</sup> LRRS, Université de Bourgogne, IUT Dijon, Bd Dr Petitjean, B.P. 17867 21078 Dijon Cedex  
montesin@u-bourgogne.fr

<sup>e</sup> LTM, Université de Bourgogne, IUT Le Creusot, 12, Rue de la Fonderie 71200 Le Creusot  
s.mattei@iutlecreusot.u-bourgogne.fr

<sup>f</sup> LTM, Université de Bourgogne, IUT Le Creusot, 12, Rue de la Fonderie 71200 Le Creusot  
dominique.grevey@u-bourgogne.fr

---

### **RESUME:**

*Dans cet article nous étudions le soudo-brasage de tôles d'acier et d'aluminium (par la technique CMT, assemblage à clin). Ces métaux ont des coefficients de dilatation thermique différents, ce qui provoque des déformations, d'où des contraintes mécaniques élevées.*

*Des expériences sur des éprouvettes, une simulation numérique thermomécanique sont menées en parallèle afin de mieux comprendre ces aspects thermiques et mécaniques dans le but de minimiser la déformation de l'assemblage.*

**MOTS-CLES :** soudo-brasage, assemblage hétérogène acier-alu, modélisation,

---

## **1 Introduction**

Les nouvelles lois européennes sur l'énergie et les normes anti-pollution qui seront effectives en 2008, imposent à l'industrie automobile de réduire la consommation des véhicules. Une des voies pour y parvenir est de réduire leur masse en utilisant des matériaux dont les propriétés spécifiques sont élevées et en prenant en compte les possibilités de recyclage. L'aluminium est une des réponses mais son coût restant assez élevé, seul le remplacement d'éléments de carrosserie est envisagé. Le coût de ces dernières en serait diminué tout en restant dans les gains de poids recommandés. Cependant cette solution nécessite l'assemblage de l'aluminium avec l'acier pour conserver l'intégralité de la structure. Si les performances mécaniques des assemblages acier/aluminium soudés atteignent aujourd'hui des efforts à rupture satisfaisants, des fissurations transversales, dommageables à leur tenue mécanique, se produisent au sein du cordon sous certaines conditions opératoires.

Plusieurs phénomènes sont soupçonnés d'être à l'origine des ces fissurations :

- La réalisation du soudo-brasage aboutit à la création d'un cordon chimiquement hétérogène dans lequel apparaît une phase métastable dont l'évolution est difficilement maîtrisable,
- L'association de matériaux à coefficient de dilatation thermique différents, peut engendrer des déformations à l'origine de contraintes mécaniques élevées.

C'est précisément pour mieux comprendre les causes de ces fissures, que les travaux que nous allons présenter ont été initiés. Ils portent sur le procédé de soudo-brasage de tôles d'acier et d'aluminium par la technique CMT (cold metal transfer). En parallèle des expériences, une simulation thermomécanique est menée pour mieux comprendre les influences sur les déformations de l'assemblage.

## 2 Technique expérimentale:

### 2.1 Matériaux

Les matériaux à assembler sont :

- Alliage d'aluminium 6016 d'épaisseur 1,2 mm avec un traitement T4,
- Acier bas carbone d'épaisseur 0,77 mm, revêtu d'une couche de galvanisation de zinc d'épaisseur 10 $\mu$ m.

Le matériau d'apport est un fil de diamètre 1,6mm en alliage d'aluminium à 12% (en poids) de silicium (composition eutectique) de nuance 4046 choisi pour sa température de fusion de 580°C compatible avec l'alliage d'aluminium à assembler.

### 2.2 Le procédé d'assemblage

Une pré-étude avait été menée en utilisant une source laser dans le cadre des travaux de thèse de A. Mathieu [1]. Cependant, compte-tenu du modèle que nous souhaitons mettre en œuvre, il est apparu judicieux de réaliser l'assemblage avec le procédé Cold Metal Transfer (CMT). Comme l'indique son nom, c'est un procédé de soudage dit "froid" dont la principale caractéristique réside dans le fait qu'il interrompt ou coupe l'arc court avec un mouvement du fil intégré dans le processus de soudage. En effet, à chaque fois qu'un court-circuit ( $F_{\max} = 70\text{Hz}$ ) se produit, la gestion du processus coupe l'alimentation électrique, d'une part et contrôle le retrait du fil d'autre part. Ce mouvement du fil favorise le détachement des gouttelettes pendant le court-circuit (figure 1). Grâce au contrôle du court-circuit, le courant et la chaleur induits dans les matières à assembler sont fortement réduits. Les effets thermiques sont ainsi diminués et le volume fondu des matériaux à assembler relativement faible.



Figure 1 : Principe du CMT

Ainsi, le métal est déposé sous forme de gouttes qui se juxtaposent les unes après les autres ce qui correspond aux cycles de brasage mises en oeuvre dans nos simulations numériques.

### 2.3 Configuration de brasage

Compte tenu de la configuration de l'assemblage à clin, il est nécessaire de travailler sur un montage de bridage dans lequel la torche est positionnée à un angle  $\alpha$  par rapport aux plaques.

avec un angle par rapport à la torche CMT (figure 2).

Les paramètres expérimentaux à prendre en compte pour l'élaboration d'un assemblage par CMT sont :

- La courbe synergique : paramètre interne de la commande CMT qui définit la tension et l'intensité en fonction de la vitesse du fil,
- La vitesse de soudure,
- La vitesse du fil,
- La correction d'arc : paramètre propre au CMT qui crée une différence de géométrie dans le cordon,
- Le stickout : longueur de fil qui dépasse de la buse
- Angles de la buse par rapport au montage,
- Intensité d'arc : intensité qui traverse le fil et qui provoque l'arc électrique. Ce paramètre est lié à la vitesse du fil,
- Tension d'arc : tension entre assemblage et la masse,
- Nature et débit du gaz de protection : Argon

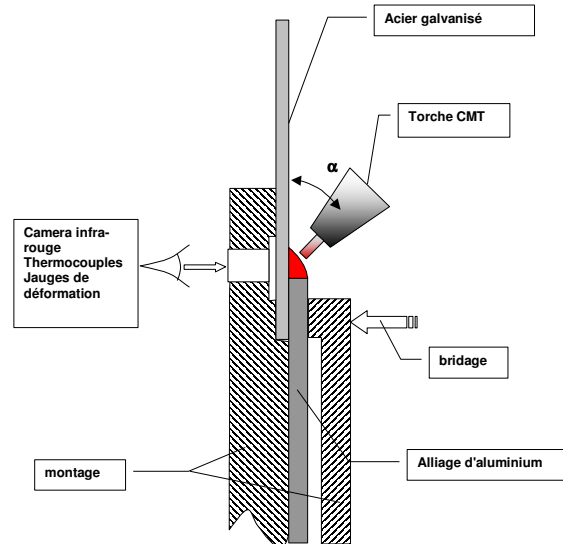


Figure 2 : Montage expérimental

Les paramètres du CMT dépendent du couple de matériaux et des dimensions des pièces à assembler. Ainsi avant de réaliser des assemblage de 300 mm de long, une recherche des paramètres optimaux est menée sur des échantillons de plus courtes longueurs.

## 3 Résultats expérimentaux

Le cordon est considéré comme correct dès qu'une géométrie de joint correcte et régulière est obtenue et qu'aucune projection ne se produit sur l'assemblage. En effet pour atteindre une bonne résistance le cordon doit présenter une géométrie n'introduisant pas de concentration de contrainte.

Au regard de notre objectif de modélisation, les critères de résistance mécaniques ne sont pas des facteurs réhibitoire. Si l'assemblage ne se rompt pas immédiatement après l'essai, il sera comparé aux résultats du modèle pour les mêmes conditions.

### 3.1 Caractérisation métallurgique des assemblages acier - aluminium

Les coupes micrographiques (Figure 3) mettent en évidence une présence importante de porosités dans le métal déposé. Les porosités sont situés dans la zone supérieure du cordon ce qui permet de penser qu'en jouant sur la durée de vie du bain, elles pourraient s'évacuer. Le débit de gaz a également une influence sur ces porosités. Des essais complémentaires sont en cours pour déterminer les conditions optimales.

En ce qui concerne les surfaces des matériaux, l'opération de soudo-brasage fond l'alliage d'aluminium contrairement à l'acier, ce qui est conforme à notre attente. En effet, pour assurer une bonne liaison, des études précédentes ont mis en évidence la nécessité de ne pas fondre l'acier pour éviter la formation de phases intermétalliques qui fragiliserait la jonction. La galvanisation de la surface joue le rôle de couche de réaction, couche où les échanges diffusifs semblent très rapides, permettant d'assurer une jonction en minimisant au maximum la formation des phases fragiles. La fusion de l'alliage d'aluminium en fonction des

paramètres utilisée peut générer des amorces de fissures (figure 5) par la présence d'une croûte d'oxyde d'aluminium qui reste piégée dans le cordon. La résistance mécanique est ainsi compromise. Une préparation des bords serait une solution mis pénalisante du point de vue économique. Aussi les paramètres conduisant à l'absence de ce défaut sont privilégiés même si cela conduit à une géométrie moins régulière du cordon (Figure 4).

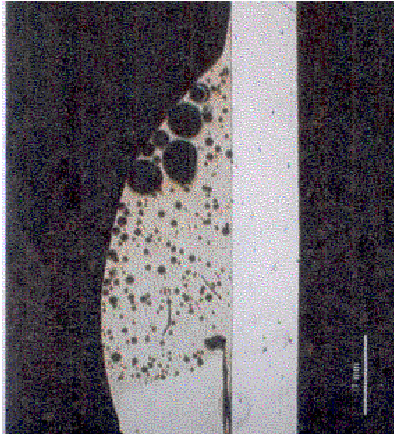


Figure 3 : Coupe transversale du cordon de la figure 3

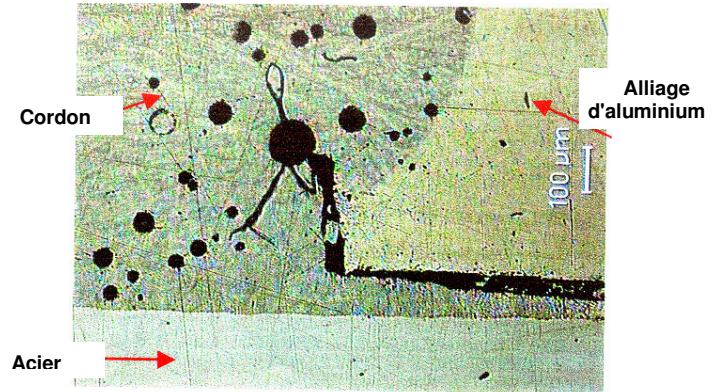


Figure 4 : amorce de fissure dans le cordon

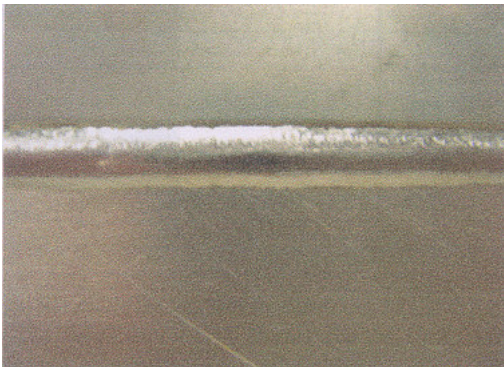


Figure 5 : cordon d'un assemblage acier-aluminium

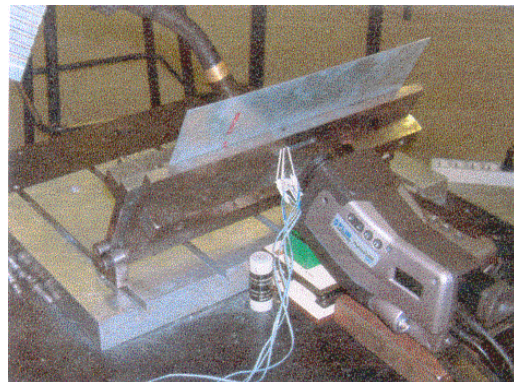


Figure 6 : photographie de l'installation "température"

### 3.2 Détermination des champs de température

Afin de mieux comprendre les mécanismes conduisant ou non à la formation de composés fragiles et donc de pouvoir prédire les conditions permettant de les éviter, nous développons des techniques de mesure des champs de température. Les deux techniques mises en œuvre actuellement (Figure 6) sont des mesures par des thermocouples implantés dans la plaque d'acier et des mesures par caméra infrarouge. 4 jonctions de thermocouples sont réalisées par microsoudage directement dans la face arrière de la plaque au niveau du cordon de soudure (soudure chaude à l'interface acier-aluminium). L'objectif est d'obtenir des températures représentatives pour caler le modèle développé ainsi que les images issues de la camera infrarouge.

L'implantation des thermocouples permet d'avoir une réponse rapide du matériau. En revanche réaliser la jonction dans le matériau nécessite un étalonnage préalable de ce dernier, la réponse de ce dernier pouvant être différente. Figure 7, sont reproduites les réponses d'une jonction non implantée, d'une jonction implantée dans l'acier et la courbe théorique du thermocouple. Il apparaît que les thermocouples implantés donnent une réponse linéaire relativement proche des tables jusqu'à une température de l'ordre de 400°C. Au delà une dérive importante est générée par la dégradation de la soudure chaude. En effet à cette température le zinc peut fondre et la composition de la soudure chaude s'en trouve modifiée, engendrant une variation importante de la valeur de température.



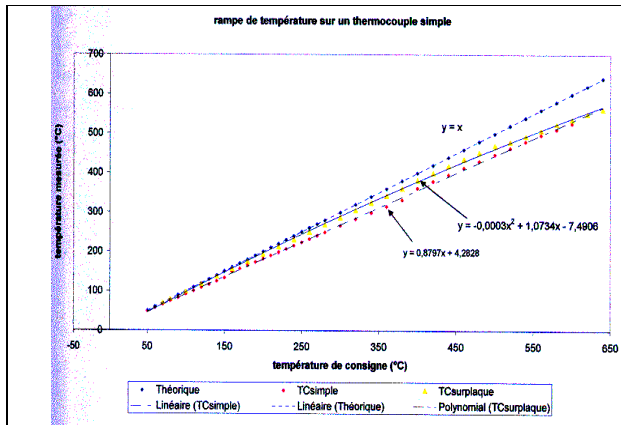


Figure 7 : courbe de réponse d'une jonction chaude de thermocouple

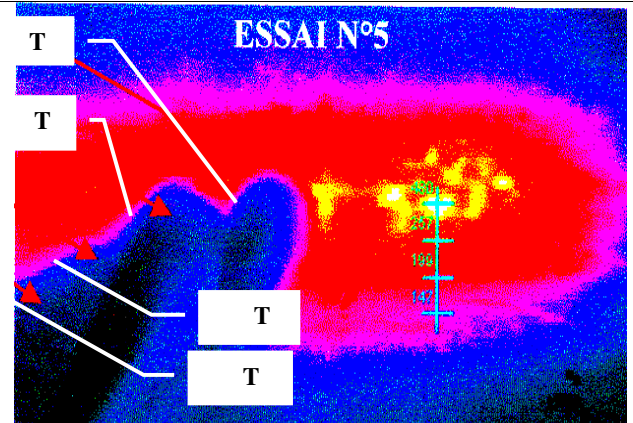


Figure 8 : Thermographie de la face arrière de la plaque d'acier

La camera infrarouge est plus difficile à mettre en œuvre, de même que l'interprétation des images. La thermographie de la Figure 8 met en évidence le gradient de température important généré par le procédé. Une corrélation est en cours entre le champ thermique et la formation des composés. Cela met en évidence l'intérêt du CMT qui permet de fondre des matériaux pour réaliser l'assemblage sans que le substrat soit affecté d'une façon importante par l'énergie apportée. Le soudage hétérogène des tôles minces est donc possible. Cependant, dans l'assemblage de matériaux dissemblables, les différences de coefficient de dilation thermique introduisent toujours des déformations permanentes et des contraintes résiduelles dans les tôles. C'est pourquoi la modélisation mise en œuvre plus loin doit nous permettre de mieux appréhender ces déformations.

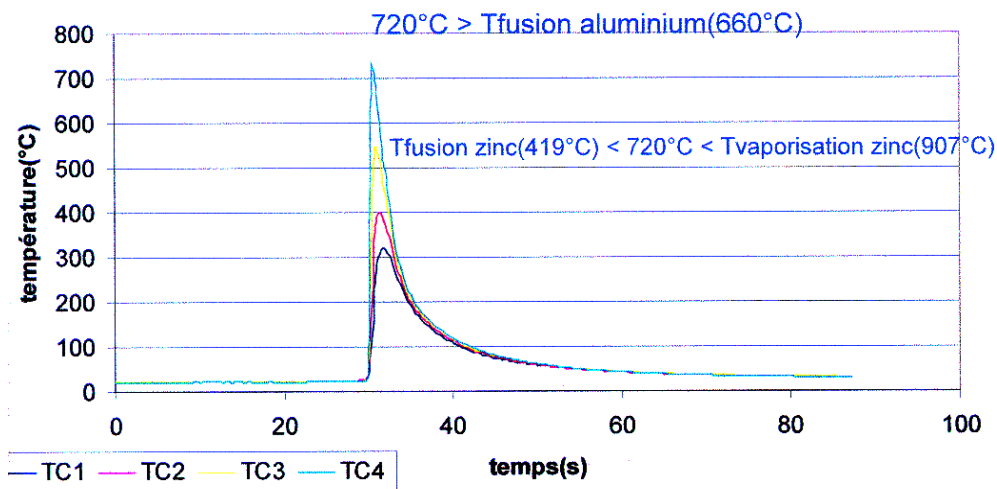


Figure 9 : Evolution de la température pour les 4 thermocouples

### 3.3 Détermination expérimentale de la déformée

Après soudage, l'assemblage est placé sous une colonne de mesure 3D. Nous obtenons un nuage de points 3D qui nous permet de comparer d'une part les essais entre eux, et de comparer l'expérience et la simulation. Cette mesure permet aussi de mieux visualiser la déformée en accentuant les déformations dans la direction z.

Le nuage de points obtenu est effectué avec un quadrillage de pas 5 à 20 mm.

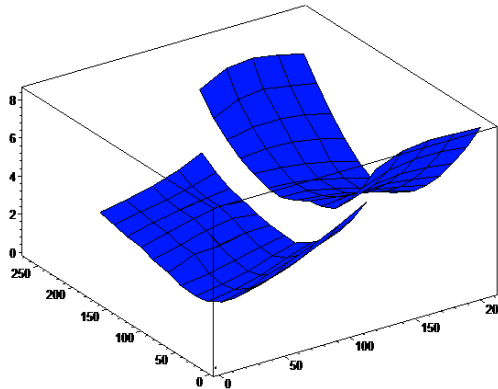


Figure 10 : Mesure de la déformée des 2 tôles soudées dans le cas d'un soudage à clin

Les mesures permettent aussi de mesurer selon la direction du cordon de soudure les déformations des éprouvettes à l'opposé du cordon pour la plaque acier et aluminium. Ces mesures permettent de comparer la convexité ou concavité de chacune des plaques.

## 4 Simulations numériques

Afin de prédire le comportement mécanique des matériaux assemblés, nous avons réalisé une modélisation thermomécanique de l'assemblage hétérogène à l'aide des éléments finis 3D (logiciel CASTEM). Le dépôt du cordon de brasage a été modélisé par un dépôt discontinu « plot par plot » de matériau à l'état fondu. A chaque pas de temps, un nouveau « plot » est déposé sur les surfaces. A la fin du processus l'assemblage est refroidi par convection naturelle.

### 4.1 Modélisation thermomécanique

Pour réaliser le maillage nous avons utilisé des éléments 3D linéaires, choix imposé par l'impossibilité de traiter le changement de phase avec des éléments quadratiques sous CASTEM. Le maillage a été raffiné autour du cordon de brasage car c'est à cet endroit que le gradient de température, de déformation et de contraintes est le plus important. La forme du cordon de soudure a été modélisée approximativement (sans prendre en compte par exemple la forme arrondie du cordon), néanmoins les dimensions des zones de contact entre le matériau d'apport et les plaques ainsi que l'aire de la section ont été scrupuleusement respectés.

Le couplage thermomécanique est de type faible, les phénomènes thermiques influant sur les comportements mécaniques, mais non l'inverse. Cette hypothèse est généralement admise dans l'étude des phénomènes de soudo-brasage.

Du point de vue thermique, la simulation fait intervenir des phénomènes de solidification et conduction durant le processus de brasage ainsi que la convection lors du refroidissement ultime de l'échantillon. Dans ces conditions, nous supposons que le flux de chaleur évacué par convection est négligeable durant la courte durée du processus de brasage (surtout pour des échantillons relativement courts) par rapport à celui dû à la conduction entre le matériau chaud et la plaque froide.

Nous avons également pris en compte les variations des paramètres matériaux avec la température. Les matériaux ont été considérés comme étant homogènes et isotropes thermiquement.

La modélisation mécanique est décrite par un comportement élasto-plastique à écrouissage cinématique linéaire. Effectivement il apparaît que dans le cas du soudage [2], la modélisation elasto-plastique à écrouissage cinématique linéaire donne des résultats satisfaisants rapportés à la lourdeur des calculs. Les caractéristiques mécaniques et thermiques sont dépendants de la température. L'évolution de la dépendance pour quelques paramètres est donnée dans la Figure 11. Les variations des paramètres sont trouvées dans la littérature [3], [4], [5].

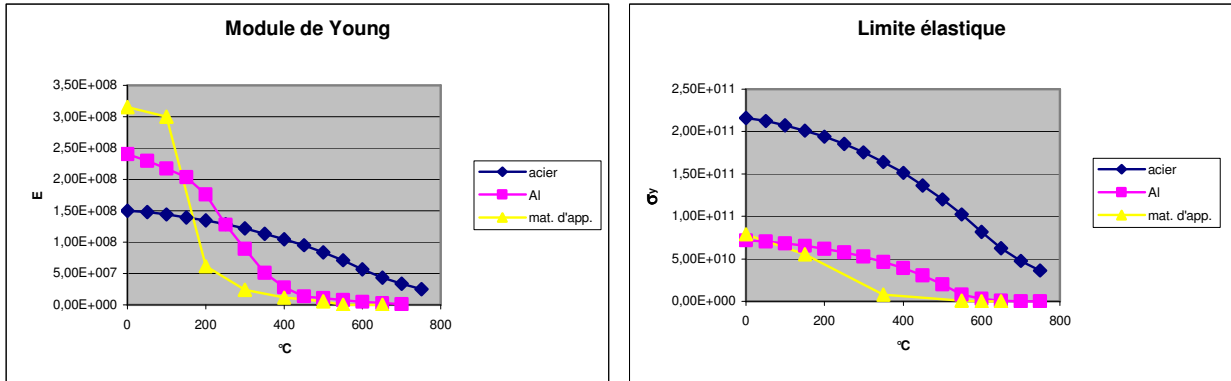


Figure 11 : Variations de  $E$  et  $\sigma_y$  avec la température

Afin de comparer les résultats expérimentaux avec les prédictions numériques nous avons traité d'abord le phénomène simple du dépôt d'un cordon de matériau d'apport sur une plaque d'aluminium. Ensuite, nous avons modélisé le brasage hétérogène acier – alliage d'aluminium, dont les résultats seront présentés au chapitre 4.3.

#### 4.2 Validation de la modélisation

Pour valider notre modélisation nous avons simulé le dépôt d'un cordon de brasage sur une plaque et nous avons comparé les résultats concernant les déformations macroscopiques post-processus avec les observations expérimentales (photographie de la plaque Figure 12). Effectivement, à la suite du dépôt d'un cordon de brasage sur une plaque d'alliage d'aluminium (6016) on peut constater une déformation macroscopique de la plaque (qui peut s'apercevoir légèrement Figure 12).

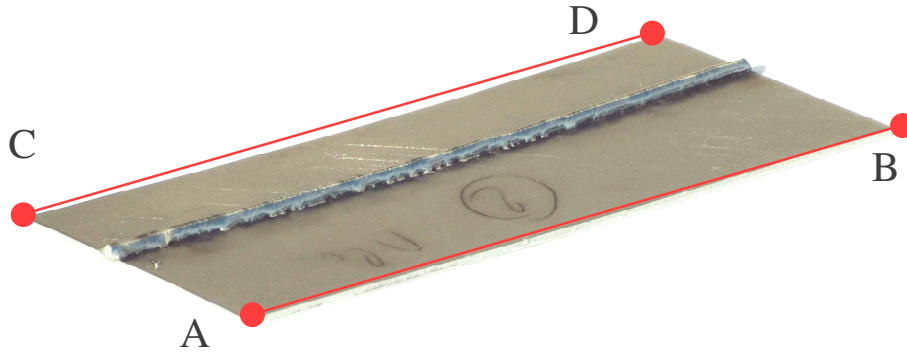


Figure 12. Photographie de l'échantillon après dépôt d'un cordon de brasage par CMT (aluminium seul) On observe un fléchissement de la plaque initialement plane.

Le bridage de la plaque pendant le processus est simulé à l'aide d'une force appliquée sur une surface et d'une zone de contact (avec la table rigide) faisant face à cette force. Le débridage est simulé par la diminution progressive de cette force jusqu'à zéro. L'imposition du bridage par un couple "force appliquée" – "conditions de contact" présente l'avantage de permettre aux matériaux de se dilater thermiquement.

La Figure 13 présente les conséquences du débridage sur la déformation de la plaque. La plaque déformée "en dièdre" avant débridage (Figure 14.a), gagne une forme incurvée selon une direction perpendiculaire au cordon de matériau d'apport (Figure 14.b), ce qui est effectivement constaté expérimentalement.

Figure 14 on peut voir une comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques sur les déplacements des points le long des droites A-B et C-D. Nous pouvons constater que nous avons le même ordre de grandeur (différence de 25%) ce qui, pour un calcul rapide, peut-être considéré comme étant d'une précision satisfaisante. Néanmoins, il faut être critique par rapport à l'aspect quantitatif, car les caractéristiques mécaniques des matériaux simulés sont issues d'une littérature assez pauvre en données à



haute température pour les matériaux utilisés. Une caractérisation mécanique des matériaux mis en oeuvre permettrait de mieux apprécier les écarts entre la simulation et l'expérience.

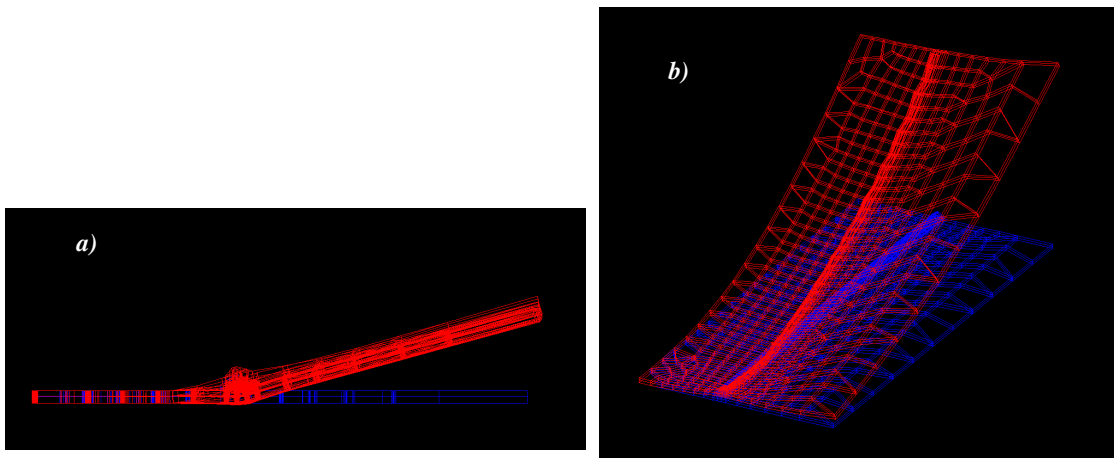


Figure 13. Déformée (rouge, amplifiés 30 fois) avant débridage (a) (vue le long du cordon) et après débridage (b) (en bleu le maillage non déformé)

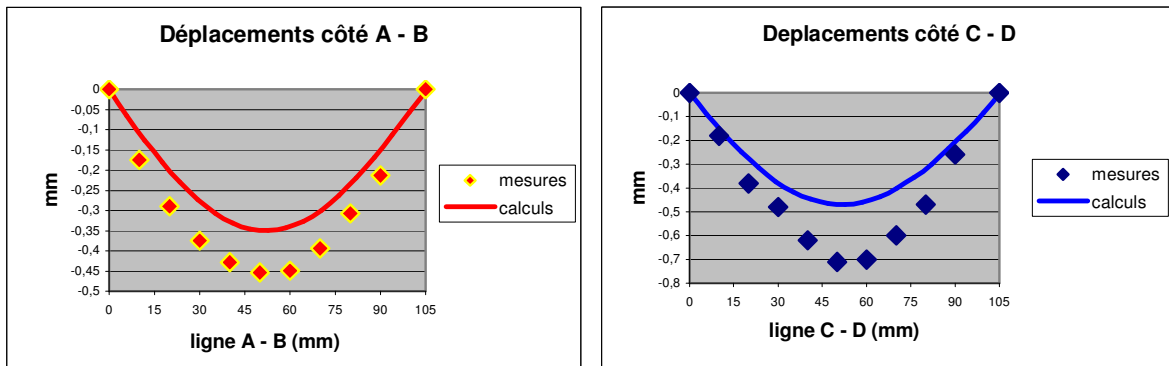


Figure 14. Profil de la déformée des bords de la plaque (calculé et mesurée)

Modélisation d'un assemblage hétérogène acier – alliage d'aluminium

Le but ultime de notre modélisation concernant l'assemblage hétérogène acier alliage d'aluminium, le problème a été abordé comme lors de la validation, mais cette-fois-ci en présence de deux plaques en configuration à clin. Un exemple de maillage utilisé est donné Figure 15.

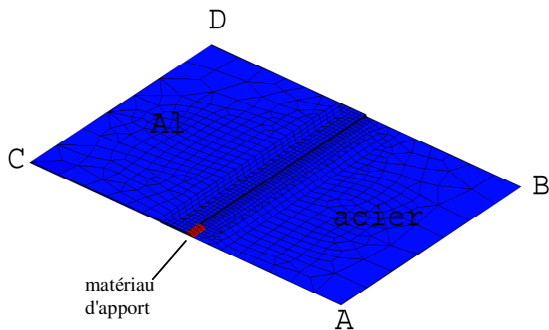


Figure 15. Maillage utilisé (les plaques sont en bleu et le matériau d'apport en rouge)

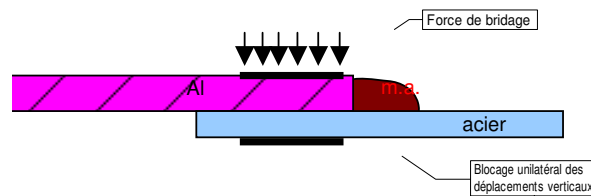


Figure 16. Blocages et forces de bridage

Nous allons nous intéresser à la déformée des plaques après brasage et refroidissement. Pour cela nous allons prendre comme référence le bord A-B de la plaque en acier et le bord C-D de la plaque en alliage d'aluminium et faire une comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques concernant la déformée de ces bords.

Les conditions aux limites utilisées pour simuler le bridage sont de plusieurs types et sont schématisées dans la coupe présentée Figure 16 :

- conditions de blocage unilatéral des déplacements de la plaque en acier selon la direction perpendiculaire au plaques. Ainsi la plaque peut se décoller librement.
- blocages pour éliminer les déplacements d'ensemble et assurer la tenue en position des plaques
- le bridage est simulé par une force appliquée à l'endroit de la bride.

Le fait de simuler le bridage par une force et non par des conditions de blocages sur les déplacements est d'une part plus réaliste et d'autre part permet de simuler le débridage, en diminuant progressivement la force à zéro à la fin du processus.

Le dépôt du matériau d'apport à l'état fondu fait dilater localement les plaques ainsi, lors du refroidissement, du fait des différences entre les coefficients de dilatation des différents matériaux en présence engendrent des contraintes résiduelles au sein des plaques. De plus, les coefficients de conduction spécifiques des matériaux, ainsi que la taille différente des surfaces de contact des plaques avec le matériau fondu produisent une propagation différente de la chaleur dans les deux plaques, influant ainsi les gradients de contraintes.

Les Figure 17 et 18 présentent les résultats des mesures et des calculs du déplacement des plaques après brasage. On observe que les plaques se comportent différemment : celle en acier présente une courbure concave alors que celle en alliage d'aluminium une convexe. Ce comportement, difficilement prévisible d'ailleurs, est visible aussi dans les résultats numériques même si un certain écart subsiste entre les valeurs calculées et mesurées.

Pour la suite, l'utilisation des propriétés des matériaux précises obtenues expérimentalement, devrait permettre d'affiner la précision des résultats numériques.

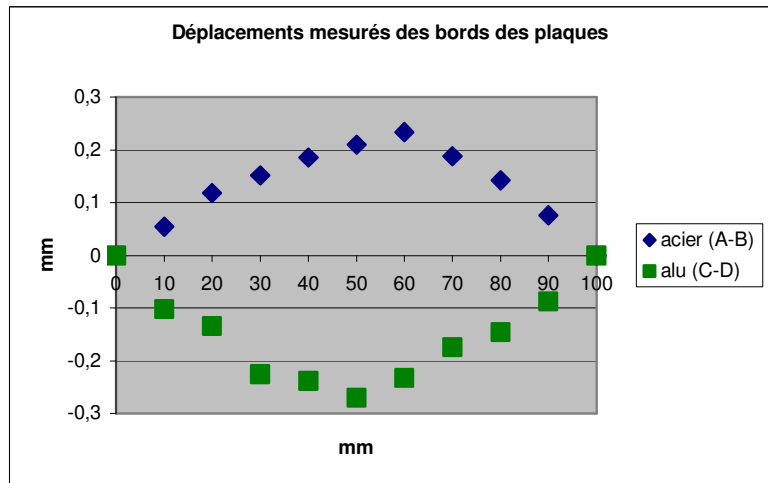


Figure 17. Mesures expérimentales sur la déformée des bords des plaques

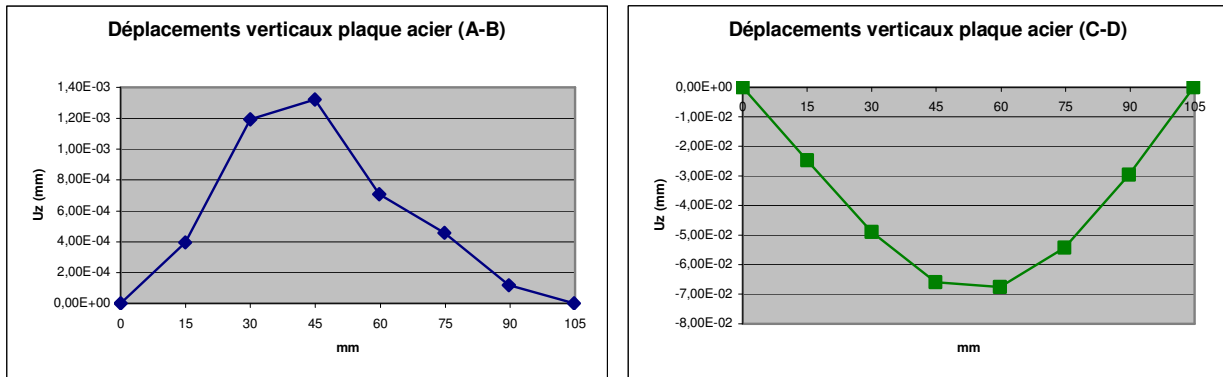


Figure 18. Résultats numériques et des mesures expérimentales sur la déformée des bords des plaques

La différence marquante entre les valeurs des déplacements calculés et mesurés pour le cas de la plaque en acier nous font penser que les paramètres des matériaux de l'acier ne sont pas corrects. Ceci

impose inévitablement une caractérisation du matériau, ce que nous allons faire dans le prolongement de nos travaux.

## 5 Conclusion

Le procédé CMT permet de réaliser des assemblages de matériaux hétérogènes avec un minimum de déformation et en limitant la formation de phases fragiles. Cependant, le procédé nécessite encore des développements en courbes paramétriques pour obtenir des cordons exempts de défauts de compacité. Le choix de l'alliage eutectique comme matériau d'apport semble répondre aux caractéristiques mécaniques attendues. En ce qui concerne l'instrumentation du procédé, nous pouvons accéder aux températures durant l'opération par le biais des thermocouples implantés, et ainsi recaler les images de la caméra infrarouge. Nous espérons définir le champ de températures pour le corrélérer avec la modélisation. La mise en place de jauges de déformation est également envisagée pour déterminer les déformations et donc les contraintes exercées pendant l'opération. Il deviendra alors possible d'analyser le comportement du cordon soumis à des contraintes thermiques.

La simulation thermo-mécanique à couplage faible a donné des résultats très encourageants concernant les déformées de point de vue qualitatif, cependant une caractérisation expérimentale des matériaux utilisés devrait permettre d'améliorer les résultats. Dans le cas de la déformée d'une plaque d'aluminium avec un cordon de matériau d'apport les écarts entre les valeurs calculée et mesurée de la déformée sont de 25%, ce que nous estimons être très prometteur. Une comparaison entre résultats numériques et expérimentaux pourrait se faire prochainement entre les états de déformation des plaques après assemblage.

L'étude présentée ici pourra à terme permettre de mieux comprendre les comportements des assemblages hétérogènes afin de contourner les difficultés liées à la formation d'intermétalliques et à l'apparition de contraintes résiduelles qui déforment les matériaux après assemblage.

### References:

- [1] A. Mathieu, *"Etude de l'assemblage hétérogène acier/aluminium obtenu par faisceau laser. Approche thermique et physico-chimique"*, thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 2005
- [2] L. Depradeux, *"Simulation numérique du soudage – Acier 316L. Validation sur cas tests de complexité croissante"*, thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2003
- [3] *"Properties of Cast Aluminium Alloys"*, ASM Handbook, Volume 2, *"Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials / Specific metals and alloys"*, 10th edition, ASM International, 1992
- [4] *"Properties of Wrought Aluminium Alloys"*, ASM Handbook, Volume 2, *"Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials / Specific metals and alloys"*, 10th edition, ASM International, 1992
- [5] *"Resistance to Fire of Aluminium Structures"*, document Pechiney Rhenalu,